

基于参数优化 VMD 和多尺度模糊熵的星-三角接法 FS-PMM 匝间短路故障诊断方法

陈滇斐^{1*}, 凌志豪¹, 李志新², 包 淼¹

(1. 河海大学 电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏 南京 210019)

Fault Diagnosis of Inter-Turn Short Circuit Fault in Star-Delta Connection FS-PMM Based on Parameter Optimization VMD and Multi-Scale Fuzzy Entropy

CHEN Zhenfei^{1*}, LING Zhihao¹, LI Zhixin², BAO Miao¹

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Marketing Service Center of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: The fractional slot permanent magnet motor winding adopts a star-delta ($Y-\Delta$) connection multi-layer winding structure, which can restrain the low order harmonic of armature magnetic field and improve the operation efficiency. However, this structure is more complex than the conventional Y connection double-layer winding structure, and the risk of inter-turn short circuit is higher. Firstly, a circuit model of inter-turn short circuit in $Y-\Delta$ connection fractional-slot permanent magnet motor (FS-PMM) is established. The fault three-phase current is derived, and fault current will be affected by the position of the inter-turn short circuit. Secondly, the whale optimization algorithm is improved by adaptive weights and Cauchy Gaussian mutation strategy. The improved whale optimization algorithm is adopted for optimizing the parameters of variational mode decomposition, and a parameter optimized variational mode decomposition algorithm for processing current signal is proposed. Finally, by calculating the multi-scale fuzzy entropy of current and torque, a fault diagnosis method for $Y-\Delta$ connection FS-PMM inter-turn short circuit is proposed. The accuracy of this fault diagnosis method can reach over 95%, and it can effectively distinguish the inter-turn short circuit fault between the Y connection part and the Δ connection part.

Key words: star-delta connection; fractional slot permanent magnet motor; inter-turn short circuit; improved whale

optimization algorithm; multi-scale fuzzy entropy; fault diagnosis

摘 要: 星-三角($Y-\Delta$)接法多层绕组结构可以抑制分数槽永磁电机电枢磁场的低次谐波磁动势,提高电机运行效率。但其结构较常规 Y 接法双层绕组结构更为复杂,发生匝间短路的风险更高。首先,建立 $Y-\Delta$ 接法分数槽永磁电机(FS-PMM)发生匝间短路的电路模型,推导出故障发生后电机三相电流,分析出三相故障电流会受匝间短路位置的影响。其次,利用自适应权重和柯西-高斯变异策略对鲸鱼捕食优化算法进行改进,用于优化变分模态分解参数,提出一种参数优化的变分模态分解算法对电流信号进行处理。最后,通过计算电流和电磁转矩的多尺度模糊熵,提出 $Y-\Delta$ 接法 FS-PMM 匝间短路故障诊断方法。该方法故障诊断准确率达到 95% 以上,并可以对 Y 接法部分和 Δ 接法部分的匝间短路故障进行有效区分。

关键词: 星-三角接法; 分数槽永磁电机; 匝间短路; 改进鲸鱼捕食算法; 多尺度模糊熵; 故障诊断

0 引言

近些年,我国电动汽车行业飞速发展,分数槽永磁电机(Fractional-Slot Permanent Magnet Motor, FS-PMM)因其容错能力好、转矩脉动低和效率高等优点,在电动汽车领域有着较好的应用前景^[1-2]。但传统的 FS-PMM 的电枢磁动势具有高幅值的低次谐波,会导致涡流损耗增加、温度升高和永磁体失磁等问题^[3]。

基金项目: 国家自然科学基金(51907052)

National Natural Science Foundation of China (51907052)

为了降低传统 FS-PMM 电枢磁动势中的低次谐波,近年来一些研究人员提出永磁电机绕组结构采用多层星-三角(Y-Δ)接法结构^[4-6]。相较于采用移相、内置磁障等技术,将多层 Y-Δ 接法结构应用于永磁电机绕组结构中易于在电机加工中实现,因此有着较好的应用前景^[7-8]。当永磁电机绕组采用多层 Y-Δ 接法结构后,对于绝缘要求会更高,但在长期复杂的工作环境下运行,永磁电机绕组绝缘会出现劣化,进而引发匝间短路。

作为永磁电机最常见的电气故障,匝间短路在故障前期难以引起注意,若没有及时检测出故障,短路电流会引起局部发热,进一步破坏电机绝缘,危及电机的运行安全,严重时可能导致电机系统瘫痪^[9-10]。针对匝间短路这一难题,国内外研究人员都进行了深入研究。目前,对于永磁电机匝间短路故障诊断的方法主要可以分为三种:第一种是基于先验知识的方法,文献[11-12]采用神经网络对采集的数据进行处理分类,进而对匝间短路进行故障诊断;第二种是基于解析模型的方法,文献[13-14]基于解析模型结合电机控制方法,采用模型预测控制、龙伯格观测器方法对匝间短路进行故障诊断;第三种是基于信号处理的方法,文献[15-16]采用小波变换进行信号处理,提取出反应故障的特征量。

常见的信号处理方法有小波变换、希尔伯特变换、经验模态分解和变分模态分解等。其中,变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)是一种自适应信号分解方法,能有效避免经验模态分解所带来的模态混叠问题。但 VMD 算法在对信号进行处理时,要预设模态分解个数和惩罚因子,参数的选取会影响到信号分解的效果,因此可以选用优化算法来对参数进行寻优^[17-19]。近些年,鲸鱼捕食优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)因其需要调节的参数少,寻优能力强,在许多领域得到应用,可以将其应用于对 VMD 算法进行参数寻优^[20]。

Y-Δ 接法的 FS-PMM 拥有两套绕组结构,绕组结构更加复杂,匝间短路故障可能发生的位置与传统 Y 接法的 FS-PMM 存在不同。当电机发生匝间短路故障,若能对电机匝间短路故障进行诊断,区分故障位置位于 Y 接法部分还是 Δ 接法部分,能及时对电机进行维修,便于对绕组进行更换^[21]。目前对于

绕组采用 Y-Δ 接法时区分是 Y 接法部分还是 Δ 接法部分发生匝间短路的研究尚且存在不足^[22-23]。

针对这个问题,本文首先建立了 Y-Δ 接法 FS-PMM 中 Y 接法部分和 Δ 接法部分绕组发生匝间短路的等效电路模型,推导出故障时的短路电流;其次,对 WOA 算法进行改进,将改进 WOA 算法对 VMD 进行参数寻优,从而对电机电流信号进行信号处理;最后,选择多尺度模糊熵作为信号特征,并采用支持向量机对 Y 接法部分匝间短路还是 Δ 接法部分匝间短路进行故障诊断。

1 匝间短路故障电流计算

1.1 Y-Δ 接法绕组结构

本文以三相 10 极 12 槽 Y-Δ 接法的四层绕组结构的 FS-PMM 为研究对象,定子上有两套偏移 30° 的绕组,分别包含 Y 接法和 Δ 接法两个部分,如图 1 所示。

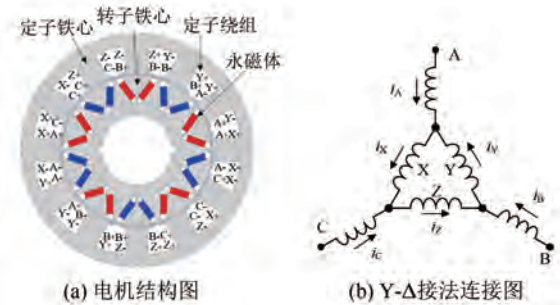


图 1 10 极 12 槽 Y-Δ 接法四层绕组的 FS-PMM
Fig. 1 10-pole 12-slot Y-Δ connected four-layer winding FS-PMM

假设三相电流均为理想正弦电流,根据基尔霍夫电流定律,推导出各部分的电流表达式:

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2} I \sin \omega t \\ i_B = \sqrt{2} I \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_C = \sqrt{2} I \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_X = \frac{i_A}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j30^\circ} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \\ i_Y = \frac{i_B}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j30^\circ} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I \sin \left(\omega t - \frac{5\pi}{6} \right) \\ i_Z = \frac{i_C}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j30^\circ} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: I 为三相电流有效值; ω 为电机电角速度。

FS-PMM 正常运行时, Y 接法部分和 Δ 接法部分各部分的阻抗保持对称相等, 因此设 Y 接法部分的阻抗为 Z_Y , Δ 接法部分的阻抗为 Z_Δ 。推导绕组 Y- Δ 接法下永磁电机在匝间短路状态下 A、B、C 三相电流时, 忽略磁饱和和漏感的影响。设短路匝数比为 $\mu = n_c/n$, 其中故障相短路匝数为 n , 故障相绕组总匝数为 n_c 。

1.2 Y 接法部分匝间短路

当 Y 接法部分的 A 相绕组发生匝间短路故障后, 绕组 Y- Δ 接法下的永磁电机的等效电路模型如图 2 所示。

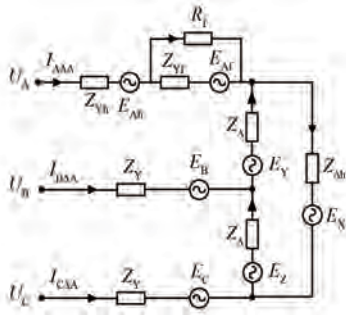


图 2 Y- Δ 接法下 A 相匝间短路等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of inter-turn short circuit in phase A with Y- Δ connection

图中: R_f 为短路过渡电阻; U_A 、 U_B 、 U_C 分别为 A、B、C 三相的电压; $I_{A\Delta A}$ 、 $I_{B\Delta A}$ 、 $I_{C\Delta A}$ 分别为 A 相发生匝间短路故障时 A、B、C 三相的电流; Z_{Yh} 、 E_{Ah} 分别为 A 相未短路部分的阻抗和反电势; Z_{Yf} 、 E_{Af} 分别为 A 相匝间短路部分的阻抗和反电势; E_A 、 E_B 、 E_C 、 E_X 、 E_Y 和 E_Z 分别为 A、B、C、X、Y 和 Z 相的反电势。

根据图 3 中的电路模型, 推导 A、B、C 三相故障电流可得:

$$\begin{cases} I_{A\Delta A} = \frac{(R_f + Z_{Yf})\alpha_{fA} + 2\mu E_A Z_{Yf}}{\beta_{f\Delta A}} \\ I_{B\Delta A} = \frac{(R_f + Z_{Yf})\alpha_{fB} - \mu E_A Z_{Yf}}{\beta_{f\Delta A}} - \frac{Z_{Yf}^2 \alpha_{f\Delta A}}{(3Z_Y + Z_\Delta)\beta_{f\Delta A}} \\ I_{C\Delta A} = \frac{(R_f + Z_{Yf})\alpha_{fC} - \mu E_A Z_{Yf}}{\beta_{f\Delta A}} - \frac{Z_{Yf}^2 \alpha_{f\Delta A}}{(3Z_Y + Z_\Delta)\beta_{f\Delta A}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} \alpha_{fA} = 2U_A - U_B - U_C - 2E_A + E_B + E_C - E_X + E_Y \\ \alpha_{fB} = 2U_B - U_A - U_C - 2E_B + E_A + E_C - E_Y + E_Z \\ \alpha_{fC} = 2U_C - U_A - U_B - 2E_C + E_A + E_B + E_X - E_Z \\ \alpha_{f\Delta A} = 3U_B - 3U_C - 3E_B + 3E_C - E_X - E_Y + 2E_Z \\ \beta_{f\Delta A} = (3Z_Y + Z_\Delta)(R_f + Z_{Yf}) - 2Z_{Yf}^2 \end{cases}$$

根据式(2)可知, 与 B、C 两相相比, A 相故障电流受到匝间短路的影响大。随着短路过渡电阻 R_f 减小和短路匝数比 μ 的增大, A 相故障电流会发生激增, 永磁电机三相不对称性加剧, 从而危及永磁电机的正常运行。

1.3 Δ 接法部分匝间短路

当 Δ 接法部分的 X 相绕组发生匝间短路故障后, 绕组 Y- Δ 接法下的永磁电机的等效电路模型如图 3 所示。

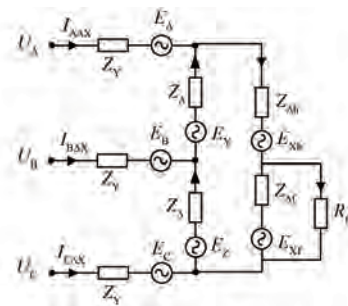


图 3 Y- Δ 接法下 X 相匝间短路等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of inter-turn short circuit in phase X with Y- Δ connection

图中: $I_{A\Delta X}$ 、 $I_{B\Delta X}$ 、 $I_{C\Delta X}$ 分别为 X 相发生匝间短路故障时 A、B、C 三相的电流; $Z_{\Delta h}$ 、 E_{Xh} 分别为 X 相未短路部分的阻抗和反电势; $Z_{\Delta f}$ 、 E_{Xf} 分别为 X 相匝间短路部分的阻抗和反电势。

根据图 4 中的电路模型, 推导 A、B、C 三相故障电流可得:

$$\begin{cases} I_{A\Delta X} = \frac{Z_\Delta(R_f + Z_{\Delta f})\alpha_{fA} + \mu E_X Z_{\Delta f}}{\beta_{f\Delta X}} - \frac{Z_{\Delta f}^2[\alpha_{1\Delta X}(Z_Y + Z_\Delta) + \alpha_{2\Delta X}Z_\Delta]}{(3Z_Y + Z_\Delta)\beta_{f\Delta X}} \\ I_{B\Delta X} = \frac{Z_\Delta(R_f + Z_{\Delta f})\alpha_{fB}}{\beta_{f\Delta X}} - \frac{Z_{\Delta f}^2 \alpha_{fB}(Z_Y + Z_\Delta)}{(3Z_Y + Z_\Delta)\beta_{f\Delta X}} \\ I_{C\Delta X} = \frac{Z_\Delta(R_f + Z_{\Delta f})\alpha_{fC} - \mu E_X Z_{\Delta f}}{\beta_{f\Delta X}} - \frac{Z_{\Delta f}^2[-\alpha_{2\Delta X}(Z_Y + Z_\Delta) + \alpha_{3\Delta X}Z_\Delta]}{(3Z_Y + Z_\Delta)\beta_{f\Delta X}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} \alpha_{1\Delta X} = U_A - U_B - E_A + E_B + E_Y \\ \alpha_{2\Delta X} = U_A - U_C - E_B + E_C + E_Y + E_Z \\ \alpha_{3\Delta X} = U_C - U_B - E_C + E_B - E_Z \\ \beta_{f\Delta X} = Z_{\Delta}(3Z_Y + Z_{\Delta})(R_f + Z_{\Delta f}) - Z_{\Delta f}^2(Z_Y + Z_{\Delta}) \end{cases}$$

根据式(3)可知,当 Δ 接法部分的 X 相发生匝间短路时,与 X 相相连的 A、C 两相的故障电流受到匝间短路的影响很大。

通过对式(2)和式(3)进行对比分析可知,当 Δ 接法部分发生匝间短路时,与故障相相连的 Y 接法部分的两相电流会受到很大影响,永磁电机的不对称性比在 Y 接法部分发生匝间短路时破坏的更加严重,从而对电机的安全运行带来更大的危害。

因此,可以通过对短路电流进行信号分析,提取有效特征,对 Y 接法部分匝间短路还是 Δ 接法部分匝间短路进行故障诊断。

2 基于改进 WOA 参数优化的 VMD 算法

2.1 VMD 算法原理

当 FS-PMM 发生匝间短路故障时,电机电流幅值和波动频率都会发生变化,因此采用 VMD 算法对电流信号进行信号处理,将电流中不同频率的信号进行分离。

VMD 算法可以将电流信号分解成 K 个本征模态分量(Intrinsic Mode Function, IMF), IMF 为一个调幅调频信号。对每个 IMF 进行希尔伯特变换,从而获得单边频谱,再将 IMF 频谱移动到相应的基频带上:

$$\left\{ \left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right\} * e^{-j\omega_k t} \quad (4)$$

式中: k 为第 k 个本征模态分量; $u_k(t)$ 为本征模态函数; $\delta(t)$ 为脉冲函数; ω_k 为 $u_k(t)$ 的中心频率; $*$ 为卷积符号。

$$\begin{cases} \min_{\omega_k} \sum_k \left\| \partial_t \left\{ \left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right\} * e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ s. t. \sum_k u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (5)$$

引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘子 $\lambda(t)$,

将约束问题转化成非约束问题,因此增广拉格朗日表达式为

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \\ & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left\{ \left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right\} * e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + [\lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

利用乘子交替方向法迭代寻找增广拉格朗日表达式的“鞍点”,从而解得本征模态函数 $u_k(t)$ 和中心频率 ω_k 。但是,利用 VMD 算法对信号分解前要先设定 IMF 个数 K 和二次惩罚因子 α 。 K 取值过大时会导致信号过分解,同一个频率被分解到多个 IMF 中去; K 取值过小时会导致信号欠分解,从而会出现模态混叠现象。二次惩罚因子 α 决定着 IMF 的带宽, α 越大,IMF 带宽越小。

2.2 基于改进 WOA 算法的参数优化方法

VMD 算法的 IMF 个数 K 和二次惩罚因子 α 这两个参数相互影响,为了得到最佳的信号分解效果,需要对两个参数同时进行寻优,获取最佳参数组合。

WOA 优化算法通过模拟鲸鱼随机搜索猎物、包围猎物、螺旋捕食行为进行寻优,WOA 优化算法具有原理简单、寻优能力强等特点。因此,本文采用 WOA 算法对 IMF 个数 K 和二次惩罚因子 α 进行参数寻优。

在搜索猎物时,鲸鱼个体不以最优鲸鱼个体位置为目标,而是选择种群中随机个体为目标来更新位置,如式(7)所示:

$$\begin{aligned} X(t+1) = X_{\text{rand}}(t) - (2ar - a)D'' = \\ X_{\text{rand}}(t) - (2 - 2t)(2r - 1)D''/T_{\text{max}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $a = 2 - 2t/T_{\text{max}}$ 为收敛因子; t 为当前迭代次数; T_{max} 为最大迭代次数; r 为 $[0, 1]$ 区间的随机数; $X_{\text{rand}}(t)$ 为随机个体; $D'' = |2rX_{\text{rand}}(t) - X(t)|$ 。

假设 p 为 $[0, 1]$ 区间的随机数,种群中最优鲸鱼个体位置即为目标猎物位置。当 $p < 0.5$ 时,其他鲸鱼个体选择包围猎物机制来更新位置;当 $p \geq 0.5$ 时,其他鲸鱼个体选择螺旋捕食机制来更新位置,如式(8)所示:

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - (2ar - a)D, & p < 0.5 \\ D' e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $X^*(t)$ 为迭代至 t 次时最优鲸鱼个体位置; $D=|2rX^*(t)-X(t)|$; $D'=|X^*(t)-X(t)|$; b 为对数螺旋的形状; l 为 $[-1,1]$ 区间的随机数。

根据 $A=2ar-a$ 的值来确定是搜索猎物还是包围猎物。当 $|A|<1$ 时,鲸鱼种群个体选择包围猎物机制来更新位置;当 $|A|\geq 1$ 时,鲸鱼种群个体选择搜索猎物机制来更新位置。

为了提高 WOA 优化算法的全局搜索能力,利用 Tent 混沌映射鲸鱼种群初始化位置,使得鲸鱼个体在空间内均匀分布。但 Tent 混沌映射存在循环周期小的问题,因此在 Tent 混沌映射上引入随机数 $\text{rand}(0,1)/N$,其中 N 为种群个数,如式(9)所示:

$$a_{i+1} = \begin{cases} \frac{2a_i + \text{rand}(0,1)}{N}, & 0 \leq a_i \leq 0.5 \\ \frac{2(1 - a_i) + \text{rand}(0,1)}{N}, & 0.5 < a_i \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

在寻优迭代后期为了防止陷入局部最优,引入柯西-高斯变异策略,选择当前迭代中最优鲸鱼个体进行变异,将变异前后的适应度进行对比,选择适应度最好的个体进行下次迭代过程,如式(10)所示:

$$X_{\text{best}}(t) = X^*(t) [1 + \lambda_1 O_c + \lambda_2 O_g] \quad (10)$$

式中: O_c 为服从柯西分布的随机数; O_g 为服从高斯分布的随机数; $\lambda_1 = 1 - (t/T_{\text{max}})^2$; $\lambda_2 = (t/T_{\text{max}})^2$ 。

随着迭代增加, λ_1 不断减小,而 λ_2 不断增大,从而防止陷入局部最优。

同时,在鲸鱼包围猎物机制和螺旋捕食机制中加入自适应权重系数:

$$w_i = w \left[1 + \sin \left(\pi + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f(t)_i - f(t)_{\text{avg}}}{f(t)_{\text{max}} - f(t)_{\text{min}}} \right) \right] \quad (11)$$

式中: w 为预设权重系数; w_i 为第 i 个鲸鱼个体的权重系数; $f(t)_i$ 为第 i 个鲸鱼个体第 t 次迭代的适应度函数值; $f(t)_{\text{avg}}$ 、 $f(t)_{\text{max}}$ 、 $f(t)_{\text{min}}$ 分别为第 t 次迭代鲸鱼群体适应度函数的平均值、最大值、最小值。

将式(11)代入式(8),当 $p \geq 0.5$ 时,采用螺旋捕食机制进行位置更新:

$$X(t+1) = D' e^{bl} \cos(2\pi l) + w_i X^*(t) \quad (12)$$

当 $p < 0.5$ 时,采用包围猎物机制进行位置更新:

$$X(t+1) = w_i X^*(t) - (2ar - a)D \quad (13)$$

当鲸鱼个体的适应度值小于平均适应度时,表明鲸鱼个体离最优位置越近, w_i 保证取得较小的值,使得鲸鱼个体能在局部空间进行位置更新;当鲸鱼个体的适应度值大于平均适应度时,表明鲸鱼个体离最优位置较远, w_i 保证取得较大的值,使得鲸鱼个体能在全局空间进行位置更新。

2.3 参数优化的 VMD 算法效果验证

采用改进 WOA 算法对 VMD 算法的 IMF 个数 K 和二次惩罚因子 α 进行参数寻优时,为保证能达到最优的分解效果,本文选用最小包络熵 $\min E_k$ 为适应度函数。包络熵反映着每个 IMF 的复杂程度和周期性,IMF 的包络熵越小,则 IMF 的周期性越明显,复杂程度越低,稀疏性越弱。

电流信号经 VMD 算法分解成 IMF 的包络熵可以表示为

$$\begin{cases} E_k = - \sum_{j=1}^N p_{k,j} \lg p_{k,j} \\ p_{k,j} = a_k(j) / \sum_{j=1}^N a_k(j) \end{cases} \quad (14)$$

式中: E_k 为第 k 个 IMF 的包络熵; $a_k(j)$ 为第 k 个 IMF 经过希尔伯特变换后得到的信号序列。

寻优中,最小包络熵越小,电流信号分解出来的每个 IMF 越简单。因此,能将匝间短路故障电流信号中复杂的故障特征分解出来,使得故障特征进一步放大。改进后的 WOA 算法流程如图 4 所示。

为了验证采用改进 WOA 算法进行参数优化的有效性,本文以 A 相正常状态下电流信号为例,将改进 WOA 算法与粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和常规 WOA 算法进行寻优对比,如图 5 所示。仿真过程中,将所有优化算法的种群数均设定为 50,迭代次数均设定为 100。为防止陷入局部最优,增大全局搜索能力,选取预设权重系数 w 为 1.2。

分析图 5 可知,PSO 算法对 VMD 算法进行参数寻优时,适应度函数最小值明显高于其他几种

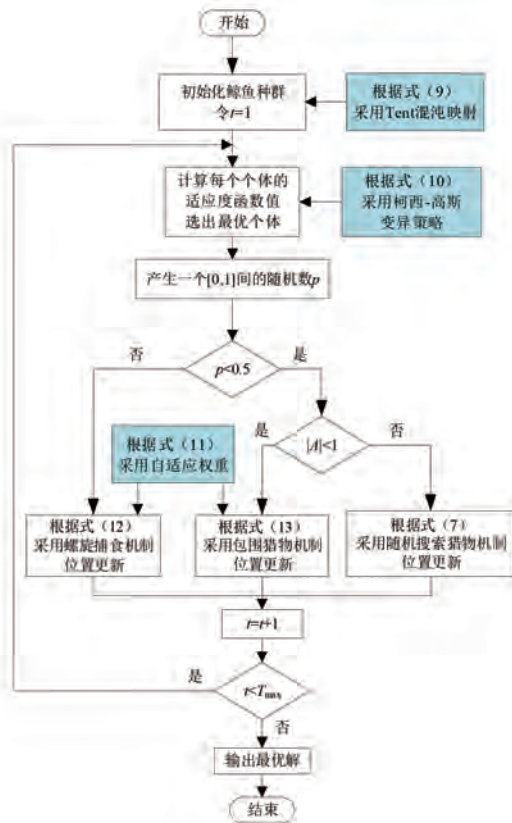


图 4 利用改进 WOA 算法进行参数优化的流程图
Fig. 4 Flowchart of parameters optimization using improved WOA algorithm

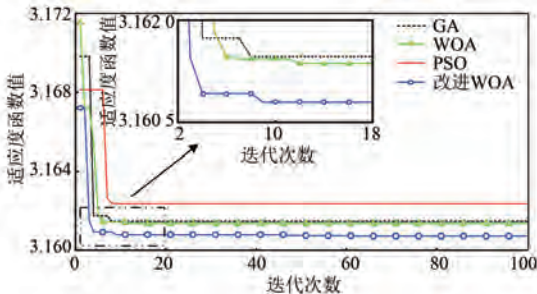


图 5 不同优化算法收敛效果对比
Fig. 5 Comparison of convergence effects of different optimization algorithms

算法,寻优效果不及其他三种算法。常规 WOA 算法虽然收敛速度没有 GA 算法快,但适应度函数最小值要略小于 GA 算法。改进 WOA 算法收敛速度明显提升,而且改进 WOA 算法的适应度函数最小值比 WOA 算法更低,寻优效果更好。因此,改进 WOA 算法在 VMD 算法对 IMF 个数 K 和二次惩罚因子 α 进行参数寻优中有着明显的效果和优势。

通过改进 WOA 参数优化的 VMD 算法对 A 相正常状态下电流信号进行分解,寻优结果 IMF 个数 K 为 6、二次惩罚因子 α 为 114.59,分解结果如图 6 所示。电流信号被分解成 6 个 IMF。

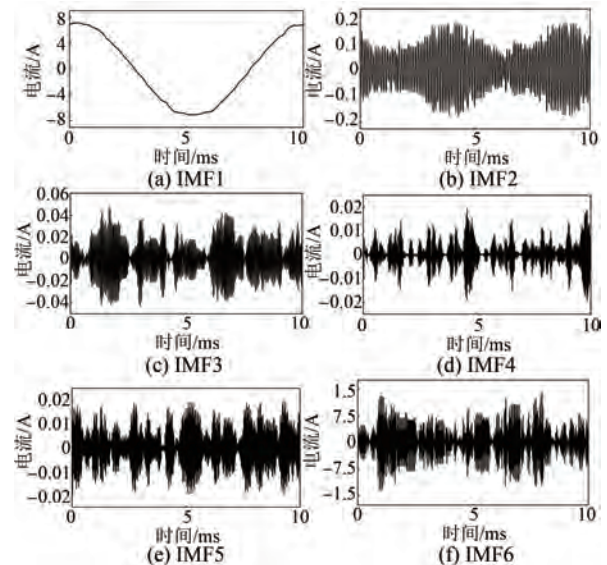


图 6 电流分解结果

Fig. 6 Results of current decomposition

每个 IMF 的中心频率分别为:98 Hz、9 851 Hz、19.56 kHz、26.9 kHz、31.03 kHz 和 39.81 kHz,未发生频谱混叠现象。因此,基于改进 WOA 参数优化的 VMD 算法能有效得将电流信号分解成不同频段下的 IMF。

3 多尺度模糊熵故障特征提取

3.1 多尺度模糊熵计算

四层绕组 Y- Δ 接法的永磁电机在 Y 接法部分还是 Δ 接法部分发生匝间短路,匝间短路时的短路电流会出现一定的差异性。模糊熵能衡量信号的复杂程度和规律性,因此模糊熵能有效反应 Y 接法部分匝间短路和 Δ 部分匝间短路电流的差异性。因此选择模糊熵作为信号特征进行提取,模糊熵的具体计算方法如下。

对 N 点信号序列 $U = \{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$ 按顺序可以构造得到 m 维向量:

$$U_i^m = \{u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)\} - u_0(i),$$

$$(i = 1, 2, \dots, N - m + 1) \quad (15)$$

式中: $u_0(i)$ 为 m 个连续 $u(i)$ 的均值,其具体表达式为

$$u_0(i) = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} u(i+k) \quad (16)$$

定义向量 U_i^m 和 U_j^m 间的距离 $d_{i,j}^m$ 为

$$d_{i,j}^m = \max_{k \in (0, m-1)} \{ | [u(i+k) - u_0(i)] - [u(j+k) - u_0(j)] | \}, (i, j = 1, 2, \dots, N-m, i \neq j) \quad (17)$$

通过模糊函数定义向量 U_i^m 和 U_j^m 的相似度 $D_{i,j}^m$ 为

$$D_{i,j}^m = e^{-(d_{i,j}^m/r)^n} \quad (18)$$

式中: n 为边界梯度; r 为相似容限。

定义函数 $\phi^m(n, r)$ 为

$$\phi^m(n, r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \left(\frac{1}{N-m-1} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m} D_{i,j}^m \right) \quad (19)$$

类似的, 当维数为 $m+1$ 时, 定义函数为

$$\phi^{m+1}(n, r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \left(\frac{1}{N-m-1} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m} D_{i,j}^{m+1} \right) \quad (20)$$

定义模糊熵 $FE(m, n, r)$ 为

$$FE(m, n, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [\ln \phi^m(n, r) - \ln \phi^{m+1}(n, r)] \quad (21)$$

当 N 为有限长度时, $FE(m, n, r)$ 可表示为

$$FE(m, n, r) = \ln \phi^m(n, r) - \ln \phi^{m+1}(n, r) \quad (22)$$

FS-PMM 在运行过程中可能会受到外界环境的影响, 导致电流信号会发生突变。而常规模糊熵容易受到信号序列突变的影响, 因此本文提取多个尺度的模糊熵, 从而避免信号序列突变带来的影响, 多尺度模糊熵具有一定的抗干扰能力且能反映出信号特征。因此在计算信号序列 U 的模糊熵前, 先将信号序列 U 进行粗粒化, 构建粗粒向量 $y_j(\tau)$:

$$y_j(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x(i), (1 \leq j \leq N/\tau) \quad (23)$$

式中: τ 为尺度因子, 当 $\tau=1$ 时, $y_j(\tau)$ 就是原始的信号序列。

原始信号序列 X 进行粗粒化处理后可以得到新的信号序列 Y , 对新的信号序列 Y 求取模糊熵, 从而得到多尺度模糊熵。

三相电流信号通过 VMD 算法分解成 K 个

IMF, 为了提取有效的故障信号特征, 也为了减少计算量, 计算每个 IMF 与原始电流信号的相关系数大小, 选取相关系数最大的 3 个 IMF, 计算其多尺度模糊熵, 构建特征向量。

3.2 故障特征分析

以短路过渡电阻 R_f 为 0.01Ω 、A 相和 X 相分别发生 5 匝匝间短路故障为例, 计算三相电流关键 IMF 的多尺度模糊熵。选取嵌入维数 $m=2$, 相似容限 $r=0.1SD$ (SD 为原始电流信号的标准差), 边界梯度 $n=2$ 。A 相电流的关键 IMF 模糊熵随尺度因子变化趋势如图 7 所示。

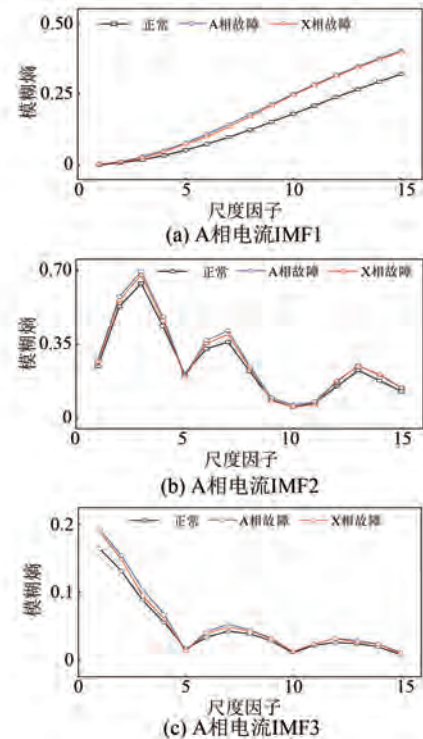


图 7 A 相电流关键 IMF 的多尺度模糊熵

Fig. 7 Multiscale fuzzy entropy of A phase current critical IMF

由图 7 可知, 当发生匝间短路时, A 相电流三个关键 IMF 模糊熵与正常状态相比有着明显增大。在 A 相和 X 相匝间短路故障程度相同时, A 相 IMF 的模糊熵略大于 X 相 IMF 的模糊熵。

B 相电流的关键 IMF 模糊熵随尺度因子变化趋势如图 8 所示。

由图 8 可知, 当发生匝间短路时, B 相电流的 IMF1 模糊熵有着明显的增大, 但 B 相电流的 IMF2 和 IMF3 模糊熵和正常状态下大小基本相等。

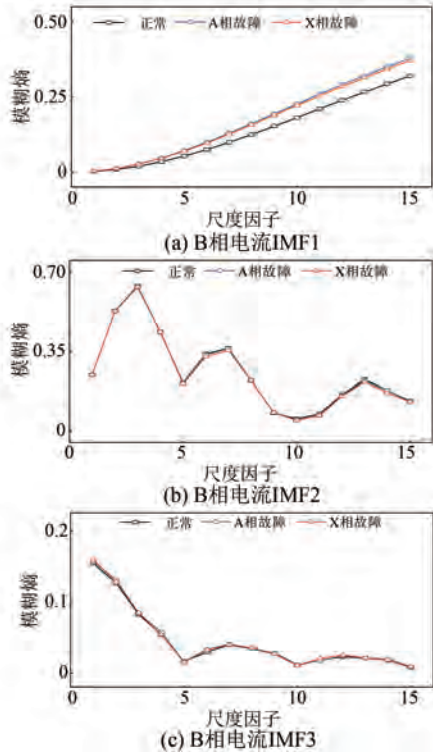


图 8 B 相电流关键 IMF 的多尺度模糊熵

Fig. 8 Multiscale fuzzy entropy of B phase current critical IMF

C 相电流的关键 IMF 模糊熵随尺度因子变化趋势如图 9 所示。

由图 9 可知,当发生匝间短路时,C 相电流 IMF1 模糊熵有着明显的增大。在 A 相发生匝间短路时,C 相电流的 IMF2 和 IMF3 模糊熵和正常状态下大小基本相等。但在 X 相发生匝间短路时 C 相电流的 IMF2 和 IMF3 模糊熵会发生增大。

对比以上分析可知,随着尺度因子增大,电流信号变得越来越简单,两种不同故障位置的模糊熵区别越来越小。为进一步诊断匝间短路故障发生位置,本文选取尺度因子 τ 为 8。

4 匝间短路故障诊断

为了进一步诊断是 Y 接法部分还是 Δ 接法部分发生匝间短路,本文进一步提取电机转矩信号,永磁电机电磁转矩表达式为

$$T_{em} = \frac{E_A I_A + E_B I_B + E_C I_C}{\omega_m} \quad (24)$$

式中: T_{em} 为电磁转矩; ω_m 为电机机械角速度; I_A 、 I_B 、 I_C 为电机三相电流。

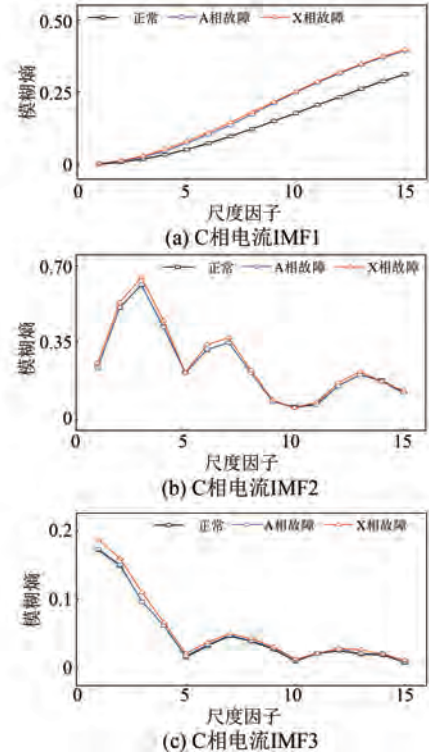


图 9 C 相电流关键 IMF 的多尺度模糊熵

Fig. 9 Multiscale fuzzy entropy of C phase current critical IMF

根据式(2)、式(3)和式(24)可知,Y 接法部分匝间短路和 Δ 接法部分匝间短路给电机三相电流带来的影响不同,进而电机电磁转矩也会出现不同。

因此,将电机转矩的多尺度模糊熵加入特征向量,最后将构建好的特征向量导入支持向量机中进行故障诊断,故障诊断流程如图 10 所示。

通过大量仿真试验,综合考虑寻优效果和迭代计算时间,改进 WOA 算法选取种群数为 50,迭代次数设定为 30,预设权重系数 w 为 1.2。

为了验证本文提出的故障诊断方法的有效性,采集如表 1 所示的数据样本集。

表 1 匝间短路数据集

Tab. 1 Datasets of inter-turn short circuit

运行状态	训练集样本个数	测试集样本个数
健康状态	40	60
匝间短路 Y 接法部分	40	60
故障状态 Δ 接法部分	40	60

对电流信号不进行信号处理,直接计算电流和电机转矩的常规模糊熵,构建特征向量,故障诊断结果如图 11 所示。

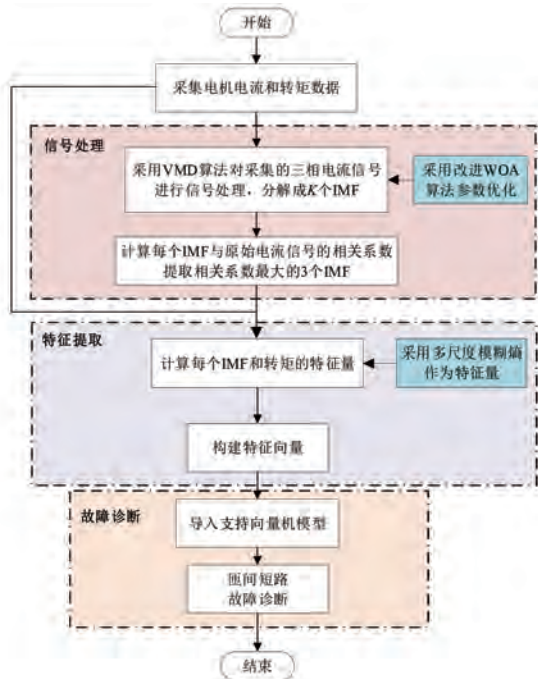


图 10 匝间短路故障诊断流程图

Fig. 10 Flowchart of inter-turn short circuit fault diagnosis

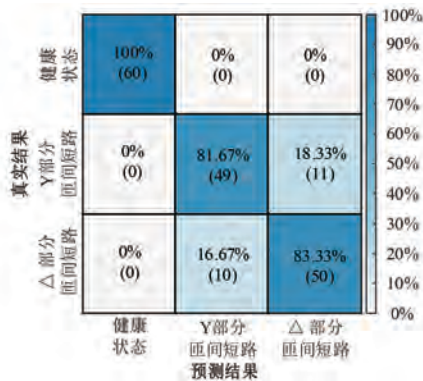


图 11 未信号处理采用常规模糊熵诊断结果

Fig. 11 Diagnostic results without signal processing and with fuzzy entropy

由图 11 可知, 由于没有对电流信号进行信号预处理, Y 接法部分匝间短路和 Δ 接法部分匝间短路两种故障状态下的电流信号无法进一步进行细化区分, 因此, 故障诊断准确率只有 88.33%。

对电流信号仍然不进行信号处理, 但计算电流和电机转矩的多尺度模糊熵, 构建特征向量, 故障诊断结果如图 12 所示。

由图 12 可知, 虽然未对电流信号进行处理, 但多尺度模糊熵比常规模糊熵提取了更多的特征点, 能提高诊断准确率, 此时故障诊断准确率达到

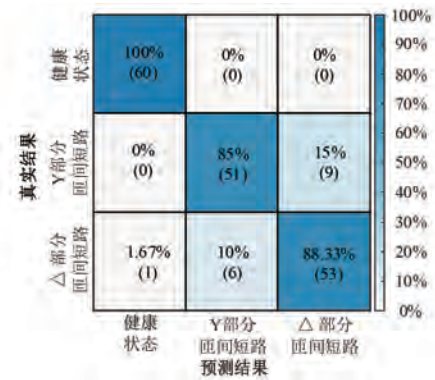


图 12 未信号处理采用多尺度模糊熵诊断结果

Fig. 12 Diagnostic results without signal processing and with multiscale fuzzy entropy

91.11%, 但对于区分 Y 接法部分匝间短路和 Δ 接法部分匝间短路两种故障状态还需要进一步提高。

对电流信号进行基于改进 WOA 的 VMD 信号分解, 提取关键的 IMF, 计算 IMF 和电机转矩的常规模糊熵, 构建特征矩阵, 故障诊断结果如图 13 所示。

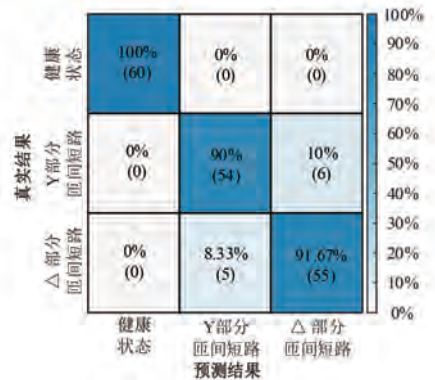


图 13 进行信号处理采用常规模糊熵诊断结果

Fig. 13 Diagnostic results with signal processing and fuzzy entropy

由图 13 可知, 对电流进行信号处理以后, 分解出了原始电流信号的 3 个关键的 IMF, 进而放大 Y 接法部分匝间短路和 Δ 接法部分匝间短路两种故障状态下的电流信号差异性, 从而提升了故障诊断准确率, 此时故障诊断准确率能达到 93.89%。

对三相电流信号进行基于改进 WOA 的 VMD 信号分解的同时, 计算 IMF 和电机转矩的多尺度模糊熵, 构建特征向量, 故障诊断结果如图 14 所示。

由图 14 可知, 对电流信号进行信号处理后, 提取多尺度模糊熵构建特征向量, 不仅能有效表

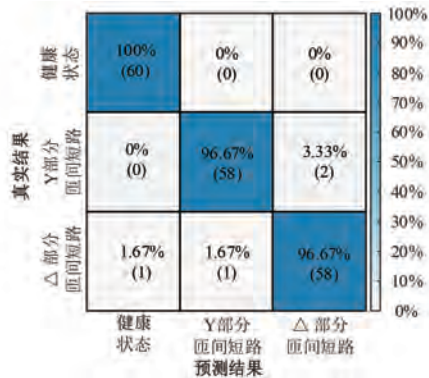


图 14 进行信号处理采用多尺度模糊熵诊断结果

Fig. 14 Diagnostic results with signal processing and multiscale fuzzy entropy

征出两个故障状态间的差异信息,而且多尺度模糊熵还能有效减小电流信号突变带来的影响,进一步提高故障诊断的准确率,此时故障诊断准确率达到 97.78%。

通过以上的对比分析可知,电流信号采用基于改进 WOA 的 VMD 算法进行信号分解以后,对关键 IMF 和电机转矩提取多尺度模糊熵,从而构建特征向量,能有效区分 Y 接法部分匝间短路和 Δ 接法部分匝间短路两种故障状态,提升故障诊断的准确率。

5 结语

本文基于 Y-Δ 接法 FS-PMM 绕组 Y 接法部分和 Δ 接法部分发生匝间短路的等效电路模型,推导短路电流,进一步分析了两种故障状态下的短路电流差异。然后,采用改进 WOA 算法对 VMD 进行参数优化,进而对三相电流信号进行信号处理。最后,提取多尺度模糊熵构建特征向量,从而进行故障诊断,研究表明:

1) 在 Y-Δ 接法下永磁电机 Δ 接法部分发生匝间短路,与故障相相连的 Y 连接部分的两相都会受到很大的故障影响;与 Y 接法部分发生匝间短路相比,Δ 接法部分发生匝间短路三相不对称性更为严重。

2) 将柯西-高斯变异策略引入 WOA 算法,有效防止寻优过程中陷入局部最优;同时在 WOA 算法中加入自适应权重,有效加快了收敛速度,提高了 WOA 算法的寻优能力。

3) 将电流信号通过参数优化的 VMD 算法进

行信号分解,放大不同位置匝间短路下的电流信号的差异性;选取多尺度模糊熵作为信号特征,能提取出有效且丰富的故障信息,这使得故障诊断准确率高达 97.78%,可以对 Y 接法部分和 Δ 接法部分的匝间短路故障进行有效区分。

参考文献

- [1] 江景成,施振川,林晓刚,等. 基于定子磁障的分数槽集中绕组永磁同步电机应用设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 68-72+83.
JIANG J C, SHI Z C, LIN X G, et al. Application design and analysis of FSCW PMSM based on stator flux barrier [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(7): 68-72+83.
- [2] 孙玉华,赵文祥,吉敬华,等. 高转矩性能多相组永磁电机及其关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1403-1420.
SUN Y H, ZHAO W X, JI J H, et al. Overview of multi-star multi-phase permanent magnet machines with high torque performance and its key technologies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1403-1420.
- [3] GUO L Y, XU J P, WU S, et al. Analysis and design of dual three-phase fractional-slot permanent magnet motor with low space harmonic [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(1): 1-12.
- [4] ZHAO W X, ZHENG J Q, JI J H, et al. Star and delta hybrid connection of a FSCW PM machine for low space harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9266-9279.
- [5] 陈滇斐,汤俊,马宏忠,等. 星-三角接法的多层绕组分数槽永磁电机谐波磁动势分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6060-6071.
CHEN Z F, TANG J, MA H Z, et al. Harmonic magnetomotive force analysis of multilayer-winding FSCW-PM machine with star-delta hybrid connection [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 6060-6071.
- [6] 汤俊,陈滇斐,李志新,等. 转子结构对低谐波星-三角绕组永磁电机性能影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3796-3805.
TANG J, CHEN Z F, LI Z X, et al. Influence of rotor structure on performance of low harmonic star-delta hybrid winding FSCW-PM machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3796-3805.

- [7] WANG Y W, QU R H, LI J. Multilayer windings effect on interior PM machines for EV applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 2208-2215.
- [8] 郑军强, 赵文祥, 吉敬华, 等. 分数槽集中绕组永磁电机低谐波设计方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊1): 272-280.
- ZHENG J Q, ZHAO W X, JI J H, et al. Review on design methods of low harmonics of fractional-slot concentrated windings permanent-magnet machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 272-280.
- [9] 郑大勇, 张品佳. 交流电机定子绝缘故障诊断与在线监测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 395-406+637.
- ZHENG D Y, ZHANG P J. A review of fault diagnosis and online condition monitoring of stator insulation in AC electrical machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 395-406+637.
- [10] 田代宗, 孙宇光, 王善铭, 等. 多相整流永磁同步发电机绕组内部相间短路的故障分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1262-1271.
- TIAN D Z, SUN Y G, WANG S M, et al. Analysis of stator internal phase-to-phase short-circuit in the multiphase permanent magnet synchronous generator with rectifier load system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1262-1271.
- [11] 李俊卿, 李斯璇, 陈雅婷, 等. 一种基于 CGAN-CNN 的同步电机转子绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 169-174.
- LI J Q, LI S X, CHEN Y T, et al. Fault diagnosis method of inter-turn short circuit of rotor winding of synchronous motor based on CGAN-CNN [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 169-174.
- [12] SONG Q, WANG M S, LAI W X, et al. On bayesian optimization-based residual CNN for estimation of inter-turn short circuit fault in PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 2456-2468.
- [13] 丁石川, 王清明, 杭俊, 等. 计及模型预测控制的永磁同步电机匝间短路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3697-3708.
- DI S C, WANG Q M, HANG J, et al. Inter-turn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine considering model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3697-3708.
- [14] 杭俊, 胡齐涛, 丁石川, 等. 基于电流残差矢量模平方的永磁同步电机匝间短路故障鲁棒检测与定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 340-350.
- HANG J, HU Q T, DING S C, et al. Robust detection and location of inter-turn short circuit fault in permanent magnet synchronous motor based on square of residual current vector modulus [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 340-350.
- [15] HANG J, ZHANG J B, XIE M J, et al. Interturn fault diagnosis for model-predictive-controlled-PMSM based on cost function and wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6405-6418.
- [16] 陈勇, 梁洪, 王成栋, 等. 基于改进小波包变换和信号融合的永磁同步电机匝间短路故障检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊1): 228-234.
- CHEN Y, LIANG H, WANG C D, et al. Detection of stator inter-turn short-circuit fault in PMSM based on improved wavelet packet transform and signal fusion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 228-234.
- [17] 薛健侗, 马宏忠. 基于 VMD 和 WOA-SVM 的变压器绕组松动故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(8): 84-90.
- XUE J T, MA H Z. Fault diagnosis winding looseness of transformer based on VMD and WOA-SVM [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(8): 84-90.
- [18] 茅宇, 杨刘, 颜亮亮, 等. 基于 VMD 的永磁同步电机初期匝间短路故障检测方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 66-74.
- MAO Y, YANG L, YAN L L, et al. Detection method of incipient inter-turn short circuit fault of PMSM based on VMD [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(9): 66-74.
- [19] 陈臣鹏, 赵鑫, 毕贵红, 等. 基于 Kmeans-VMD-LSTM 的短期风速预测[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(12): 85-93.
- CHEN C P, ZHAO X, BI G H, et al. Short-term wind speed prediction based on Keams-VMD-LSTM [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(12): 85-93.
- [20] 于永进, 姜雅男, 李长云. 基于鲸鱼优化-长短期

- 记忆网络模型的机-热老化绝缘纸剩余寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3162-3171.
- YU Y J, JIANG Y N, LI C Y. Prediction method of insulation paper remaining life with mechanical-thermal synergy based on whale optimization algorithm-long-short term memory model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3162-3171.
- [21] 陈滇斐, 凌志豪, 范晨阳, 等. 星-三角接法的分数槽永磁电机匝间短路故障分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 181-187.
- CHEN Z F, LING Z H, FAN C Y, et al. Analysis of inter-turn short circuit fault of fractional slot permanent magnet machine with star-delta connection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 181-187.
- [22] 陈滇斐, 王枫, 李志新, 等. Y- Δ 接法分数槽永磁电机断相故障电流特征分析与诊断方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024-6-19. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231539>.
- CHEN Z F, WANG F, LI Z X, et al. Current characteristic analysis and diagnosis method of open circuit fault in fractional slot permanent magnet machine with star-delta hybrid connection [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024-6-19. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231539>.
- [23] 陈滇斐, 范晨阳, 汤俊, 等. 基于田口法的星-三角 FSPMM 电磁性能优化研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 135-145.
- CHEN Z F, FAN C Y, TANG J, et al. Optimization of electromagnetic performance of star-delta FSPMM based on Taguchi method [J]. Journal of He'nan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(3): 135-145.

收稿日期:2024-01-15

收到修改稿日期:2024-03-20

作者简介:

陈滇斐(1987-),女,博士,副教授,研究方向为永磁电机设计与电磁分析、电力设备故障诊断,chenzhenfei@hhu.edu.cn;

* 通信作者:陈滇斐(1987-),女,博士,副教授,研究方向为永磁电机设计与电磁分析、电力设备故障诊断,chenzhenfei@hhu.edu.cn。

Fault Diagnosis of Inter-Turn Short Circuit Fault in Star-Delta Connection FS-PMM Based on Parameter Optimization VMD and Multi-Scale Fuzzy Entropy

CHEN Zhenfei^{1*}, LING Zhihao¹, LI Zhixin², BAO Miao¹

(1. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Marketing Service Center of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Key words: star-delta connection; fractional slot permanent magnet motor; inter-turn short circuit fault; improved whale optimization algorithm; multi-scale fuzzy entropy; fault diagnosis

In recent years, fractional-slot permanent magnet motor (FS-PMM) has good application prospects in the field of electric vehicles, which will exhibit high-amplitude low-order harmonic components. The FS-PMM winding adopts a star-delta ($Y-\Delta$) connection multi-layer winding structure, which can restrain the low order harmonic of armature magnetic field and improve the operation efficiency. However, this structure is more complex than the conventional Y connection double-layer winding structure, and the risk of inter-turn short circuit is higher.

In this paper, a circuit model of inter-turn short circuit in $Y-\Delta$ connection FS-PMM is established. The fault three-phase current is derived, and the influence of the position of inter-turn short circuit on the fault current is analyzed. The whale optimization algorithm (WOA) is improved by adaptive weights and Cauchy Gaussian mutation strategy. Cauchy Gauss mutation strategy is introduced into WOA to effectively prevent falling into local optimization. At the same time, the adaptive weight is added to the WOA, which effectively speeds up the convergence speed and improves the optimization ability of WOA.

The improved WOA is adopted for optimizing the parameters of variational mode decomposition (VMD). A parameter optimized VMD algorithm for processing current signal is proposed.

To prevent motor operation fluctuations from affecting fault diagnosis, the multi-scale fuzzy entropy is used as fault characteristics. Finally, a fault diagnosis method for $Y-\Delta$ connection FS-PMM inter-turn short circuit is proposed.

The accuracy of this fault diagnosis method can reach over 97.78% is shown in Fig.1. And it can effectively distinguish the inter-turn short circuit fault between the Y connection part and the Δ connection part.

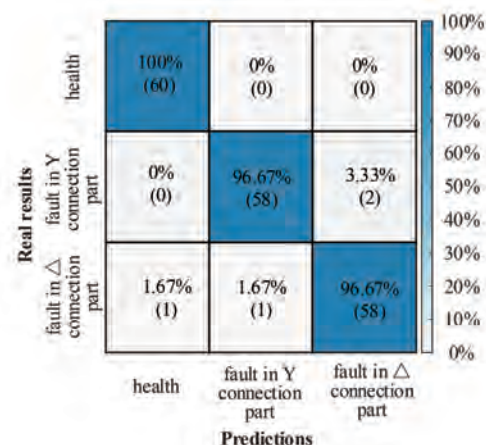


Fig. 1 Diagnostic results with signal processing and multiscale fuzzy entropy