



基于瞬时功率的永磁同步电机 匝间短路实时预警技术研究

杨帆¹, 钟勇^{1,2}, 胡亮¹, 王跃¹, 冯凌¹
(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 永磁同步电机以其体积小、效率高、功率密度大等优点被广泛应用于轨道交通、风力发电、工业传动、电动汽车等领域。但由于永磁电机的制造工艺难度高、工作环境复杂等问题, 在运行过程中定子绕组容易出现匝间短路故障。针对这一问题, 文章提出了一种基于电机瞬时功率的永磁同步电机匝间短路故障实时预警技术。该技术可在电机运行过程中通过对电机的瞬时功率进行离散傅里叶分析并对其二次分量幅值进行提取, 以此表征匝间短路故障。文章最后通过仿真对该技术进行了分析和验证, 结果显示该预警技术有效。该技术提升了永磁同步电机故障诊断的可靠性和实时性, 可为列车的主动安全技术设计等提供参考。

关键词: 永磁同步电机; 匝间短路; 瞬时功率; 离散傅里叶变换; 仿真

中图分类号: U264.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)04-0112-10

0 引言

永磁同步电机 (permanent-magnet synchronous motor, PMSM) 定子匝间短路故障 (turn-to-turn short circuit faults, TTSCF), 需要及时诊断并采取保护措施, 否则故障可能会扩展进而引起相间短路, 进一步威胁设备的正常运转^[1-6]。通过对电机定子电流、电压的监测和分析, 能快速获取 TTSCF 故障发生的信息, 为及时诊断和处理故障提供依据, 实现非侵入性实时监测^[1-3]。但是, 在 TTSCF 的初期, 短路匝数少, 短路电阻大, 短路支路电流小, 反应在电机电流和电压上的不平衡特征比较微弱; 同时, 电机本身存在一定的不平衡性, 而且供电电压也会有一定的负序分量, 逆变器供电的电机电压和电流谐波含量大, 这都会对 TTSCF 诊断造成干扰, 因此故障诊断难度较大。

传统的电机 TTSCF 故障诊断方法包括负序电流法、电流谐波法、电流矢量法、零序电压法、高频注入法

等^[7-11]。负序电流法^[12-13]是以 TTSCF 状态下电机三相电流中的负序电流分量为主的故障检测与评估方法。但在实际应用中, 定子绕组不对称、逆变器输出电压不平衡等因素同样会在三相电流中引入负序电流分量, 从而影响该诊断策略的准确度。电流谐波法^[14-18]利用电机 TTSCF 线圈的磁动势在气隙磁场中引入的附加谐波分量进行诊断, 该分量会在定子绕组中感生出谐波电流, 利用快速傅里叶分析等信号处理技术可实时监测频域中的特定谐波特征实现故障检测。但该方法易受负载波动的谐波分量、电机闭环控制对谐波的抑制作用等的干扰, 诊断精度不够。电流矢量法^[19-20]分析电机电流矢量在静止坐标系中、同步坐标系中的轨迹特征, 并从电流矢量的移动轨迹中监测电机故障的变化趋势。但该方法受电机电流谐波影响严重且轻载下的电流矢量轨迹提取困难。高频注入法^[21-23]是通过变流器向定子绕组中注入高频电压, 并通过分析电流信号响应对定子绕组进行故障诊断。但该方法通常用于电机处于静止状态下的检测, 电机在动态过程中会引入较

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4301100)

通信作者: 冯凌, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力牵引传动及其控制方面的研究; E-mail: fengling@csrzc.com

引用格式: 杨帆, 钟勇, 胡亮, 等. 基于瞬时功率的永磁同步电机匝间短路实时预警技术研究[J]. 机车电传动, 2025(4): 112-121.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.014.

Citation: YANG Fan, ZHONG Yong, HU Liang, et al. Real-time warning for turn-to-turn short-circuits in PMSM based on instantaneous power[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 112-121.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.014.

大的电磁噪声和电机损耗, 影响电机闭环控制系统的稳定性。文献[24]通过对不同调制方式下每个开关器件在开路故障时的瞬时功率表现进行分析, 提出了一种基于瞬时功率的故障判断与定位方法。文献[3]和文献[25]通过快速傅里叶分析提取与 TTSCF 故障相关的转矩频率成分, 结果表明 TTSCF 故障电机的转矩含有明显的二次和四次谐波分量。

通过以上分析, 为更好地实现永磁同步电机早期 TTSCF 故障预警, 本文所研究的瞬时功率法综合利用永磁同步电机三相电压和电流信号, 通过离散傅里叶分析提取瞬时功率中的二倍频特征量, 并利用该特征量幅值的大小表征故障程度, 可较好地解决电压不平衡的问题。

1 正常状态与 TTSCF 故障时的 PMSM 模型

假设三相永磁同步电机定子绕组为“Y”型连接, 其中 A 相绕组发生 TTSCF 故障, 示意图如图 1 所示。图 1 中, 符号 A、B、C 分别代表电机三相绕组, O 为三相绕组中性点, 每相绕组的线圈串联, i_A 、 i_B 和 i_C 分别为三相绕组电流, i_f 为流经短路匝的电流, R_f 为短路匝之间可能存在的外部阻抗。

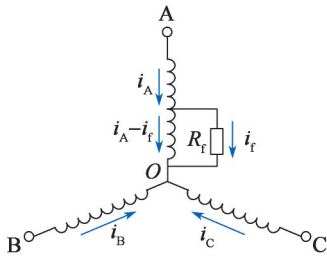


图1 三相永磁电机定子 TTSCF 示意图

Fig. 1 TTSCF schematic of PMSM stator

不考虑 TTSCF 支路的三相永磁同步电机, 以电流幅值不变作为约束条件, 其磁链在 $\alpha\beta$ 坐标系下 α 轴、 β 轴上的分量 ψ_α 、 ψ_β 如下:

$$\left. \begin{aligned} \psi_\alpha &= i_\alpha (L_d \cos^2 \theta + L_q \sin^2 \theta) + i_\beta (L_d - L_q) \sin \theta \cos \theta + \sqrt{3/2} \cdot \psi_m \cos \theta \\ \psi_\beta &= i_\alpha (L_d - L_q) \sin \theta \cos \theta + i_\beta (L_d \cos^2 \theta + L_q \sin^2 \theta) + \sqrt{3/2} \cdot \psi_m \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i_α 、 i_β 分别为 α 轴、 β 轴电流分量; L_d 、 L_q 分别为永磁同步电机 d 轴、 q 轴电感; θ 为 d 轴轴线与电机 A 相绕组轴线之间的夹角; ψ_m 为永磁体励磁磁链。

$\alpha\beta$ 坐标系下永磁同步电机的转矩方程和电压方程为:

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha &= R_s i_\alpha + \frac{d\psi_\alpha}{dt} \\ u_\beta &= R_s i_\beta + \frac{d\psi_\beta}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_n (\psi_m i_q - \psi_\beta i_\alpha) \quad (3)$$

式中: u_α 、 u_β 分别为 α 轴、 β 轴的电压分量; R_s 为定子电阻; T_e 为电机电磁转矩; P_n 为电机定子极对数。

在 dq 坐标系中, 永磁同步电机的等效模型如图 2 所示。图 2 中, i_s 为电机定子三相电流合成空间矢量; i_d 和 i_q 分别为 d 轴、 q 轴电流分量; u_d 、 u_q 分别为 d 轴、 q 轴电压分量; β 为电机定子三相电流合成空间矢量 i_s 和永磁体励磁磁场 d 轴轴线之间的夹角, 又称为转矩角。

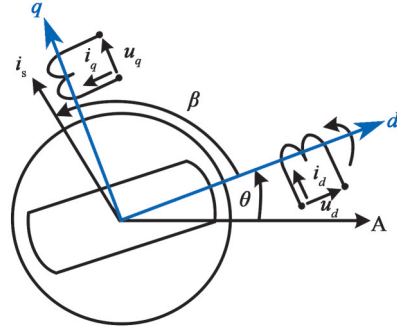


图2 dq坐标系中永磁同步电机模型

Fig. 2 PMSM stator model in dq coordinate system

经过分析可知, dq 坐标系下的磁链及电压方程为:

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_m \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q &= R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \psi_m) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 轴、 q 轴磁链分量; ω 为电角速度。

式(4)和式(5)的电感 L_d 和 L_q 可表示为:

$$\left. \begin{aligned} L_d &= L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m \\ L_q &= L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: L_s 为相定子电感; L_m 为相定子漏感; M_s 为相间互感。

根据图 2 中 $i_d = i_s \cos \beta$ 、 $i_q = i_s \sin \beta$, 可得到电磁转矩方程 T_e 为

$$T_e = \frac{3}{2} P_n [\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (7)$$

TTSCF 故障的严重程度用故障系数 μ 表示, μ 为故障相短路匝数与故障相线圈总匝数之比。假设 TTSCF 发生在 A 相, 将匝间短路电流 i_f 变换到静止两相 $\alpha\beta$ 坐标系上, 可得

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha f} \\ i_{\beta f} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} i_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $i_{\alpha f}$ 、 $i_{\beta f}$ 分别为匝间短路电流在 α 轴、 β 轴上的

分量。

结合式(1)、式(2)得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} - \mu R_s \begin{bmatrix} \frac{2}{3} i_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$u_f = R_f i_f = \mu R_s (i_\alpha - i_f) + p \psi_f \quad (10)$$

式中： ψ_f 为短路绕组磁链； p 为微分算子。

令 $L_1 = (L_d + L_q)/2$ ， $L_2 = (L_d - L_q)/2$ ，则 $\alpha\beta$ 坐标系下的磁链方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 + L_2 \cos(2\theta) & L_2 \sin(2\theta) \\ L_2 \sin(2\theta) & L_1 - L_2 \cos(2\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \cos(\theta) \\ \psi_m \sin(\theta) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \mu i_f (L_1 + L_2 \cos(2\theta)) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

电磁转矩方程可以表示为

$$T_e' = P_n \cdot \vec{\psi}_s \times \vec{i}_s = \frac{3}{2} P_n \left[\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha - \frac{2}{3} \mu i_f \right] \quad (12)$$

式中： T_e' 为匝间短路故障时电磁转矩； $\vec{\psi}_s$ 为定子磁链矢量； $\vec{i}_s$ 为等效定子电流矢量。

将式(12)的部分变量变换到旋转 dq 坐标系，于是得到

$$T_e' = \frac{3}{2} P_n \left[\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] + P_n \left[\mu i_f \psi_m \sin \theta - 2 \mu i_f L_2 \cos(2\theta) i_\beta + \mu i_f L_2 \sin(2\theta) i_\alpha \right] \quad (13)$$

从上述公式可以看出，电磁转矩由两个部分组成，一部分为正常电磁转矩 T_{e_normal} ，另一部分为故障电磁转矩 T_{e_fault} ，即：

$$\left. \begin{aligned} T_e' &= T_{e_normal} + T_{e_fault} \\ T_{e_normal} &= \frac{3}{2} P_n \left[\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \\ T_{e_fault} &= P_n \left[\mu i_f \psi_m \sin \theta - 2 \mu i_f L_2 \cos(2\theta) i_\beta + \mu i_f L_2 \sin(2\theta) i_\alpha \right] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(14)可以得出结论：由于TTSCF的发生，局部的短路环流 i_f 将产生附加的电磁转矩。假设电机为面装式永磁同步电机，则 $L_d = L_q$ ，设 $\theta = \omega t + \theta_0$ ， $i_f = I_{fm} \sin(\omega t + \theta_{f0})$ ， I_{fm} 为 i_f 的幅值， θ_{f0} 为 i_f 的初始相角， θ_0 为 θ 的初始相角。将参数代入式(13)可得

$$\begin{aligned} T_e' &= \frac{3}{2} P_n \left[\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] + \\ &P_n \mu i_f \psi_m \sin \theta = \frac{3}{2} P_n \left[\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] + \\ &P_n \mu \psi_m I_{fm} \sin(\omega t + \theta_{f0}) \sin(\omega t + \theta_0) = \frac{3}{2} P_n \cdot \\ &\left[\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] + \frac{1}{2} P_n \mu \psi_m I_{fm} \cos(\theta_{f0} - \theta_0) - \\ &\frac{1}{2} P_n \mu \psi_m I_{fm} \cos(2\omega t + \theta_{f0} + \theta_0) \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可以看出，由于局部的短路环流 i_f 的作用，在电磁转矩中出现了附加的直流分量和2倍频交流分量，这种现象也可以从序分量的角度进行解释。A

相短路环流产生单相脉振磁场，该脉振磁场可以分解为两个速度相同但方向相反的旋转磁场，即正序磁场和负序磁场，正序磁场与转子磁场作用产生直流的电磁转矩，负序磁场与转子磁场作用产生2倍频交流电磁转矩。

通过电磁转矩计算出的瞬时有功功率 P_e 可表示如下：

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{T_e' \cdot n}{9550} = \frac{3}{2} P_n \left[\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] \cdot \frac{n}{9550} + \\ &\frac{1}{2} P_n \mu \psi_m I_{fm} \cos(\theta_{f0} - \theta_0) \cdot \frac{n}{9550} - \\ &\frac{1}{2} P_n \mu \psi_m I_{fm} \cos(2\omega t + \theta_{f0} + \theta_0) \cdot \frac{n}{9550} \end{aligned} \quad (16)$$

式中： n 为PMSM转速，r/min。

由式(16)可知，发生TTSCF后的永磁电机其瞬时有功功率同样包含附加的直流分量和2倍频交流分量。

2 基于瞬时功率的TTSCF诊断算法

基于上述分析可知，当永磁电机发生TTSCF时，与非TTSCF的电机相比，电机瞬时功率会出现附加的直流分量和2倍频交流分量。因此，本方案通过计算并提取真实电机瞬时功率中的2倍频交流分量含量来表征匝间故障严重程度。

基于瞬时功率的TTSCF诊断原理框图如图3所示。由于离散傅里叶分析所需的计算资源较大，本方案在不影响主控制核运行的前提下，拟采用辅助核CLA(control law accelerator)数据处理芯片进行相关计算。

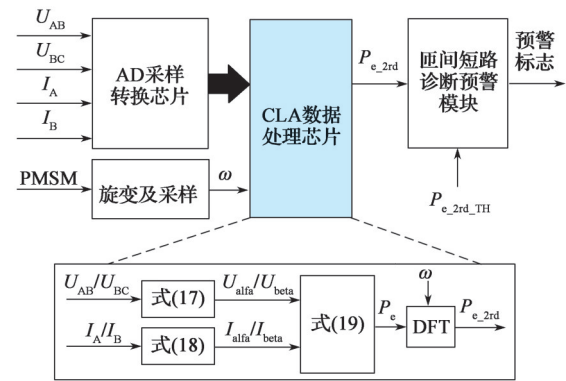


图3 诊断流程图(CLA诊断框架)

Fig. 3 Flowchart of diagnosis (CLA diagnostic framework)

线电压 U_{AB} 、 U_{BC} 及相电流 I_A 、 I_B 经由AD采样转换芯片采样后，其采样值传输到CLA数据处理芯片，由CLA计算得到当前电机的瞬时功率 P_e ；再结合电机当前电角速度 ω ，通过离散傅里叶变换(DFT)提取出瞬时功率 P_e 的二次谐波分量 P_{e_2rd} 的幅值；最后通过TTSCF预警模块判断，在二次谐波分量 P_{e_2rd} 幅值达到预警阈值 $P_{e_2rd_TH}$ 时发出TTSCF预警标志。

CLA芯片中对采样值计算如式(17)、式(18)和式(19)。

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{alfa}} &= \frac{2}{3} \left(U_{\text{AB}} + \frac{1}{2} U_{\text{BC}} \right) \\ U_{\text{beta}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} U_{\text{BC}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{alfa}} &= I_{\text{A}} \\ I_{\text{beta}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (I_{\text{A}} + 2I_{\text{B}}) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$P_{\text{e}} = \frac{3}{2} (U_{\text{alfa}} \cdot I_{\text{alfa}} + U_{\text{beta}} \cdot I_{\text{beta}}) \quad (19)$$

定义采样周期为 T_s , 一个电机输出周期内的采样点数为 N , 电机的输出周期为 $T_e = NT_s$, 电机输出功率的基波角频率 $\omega_p = 2\pi/T_e = 2\pi/(NT_s)$, 连续时间函数下的电机瞬时功率为 $p_e(t)$, 瞬时功率在 $t = nT_s$ 时刻的采样值为 $p_e(nT_s)$, 连续傅里叶级数的第 k 次复系数为 $P_e(k\omega_p)$, 离散傅里叶变换的第 k 个频点系数为 $P_e[k]$ 。容易得出, $P_e(k\omega_p)$ 在连续傅里叶级数中的表达式为

$$P_e(k\omega_p) = \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} p_e(t) e^{-jk\omega_p t} dt \quad (20)$$

离散后近似为

$$P_e(k\omega_p) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_e[n] e^{-j\frac{2\pi}{N} kn} \quad (21)$$

令 $P_e[k] = P_e(k\omega_p) T_s$, 式中, $0 \leq k < N$ 且 $k \in \mathbf{Z}$ 。将 $P_e[k]$ 代入式(21)并进行归一化可得DFT公式为

$$P_e[k] = \sum_{n=0}^{N-1} p_e[n] e^{-j\frac{2\pi}{N} kn} \quad (22)$$

离散傅里叶逆变换的表达式为

$$p_e[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P_e[k] e^{j\frac{2\pi}{N} kn} \quad (23)$$

为实现正逆变换的自治性, $1/N$ 仅需置于正变换或逆变换其中之一之前, 通常选择置于逆变换前。

通过式(20)~式(22)对电机瞬时功率 p_e 进行离散傅里叶分析, 即可得到瞬时功率的二次分量 $P_{e_{2rd}}$ 的幅值。

3 仿真验证

基于某轨道交通永磁同步电机参数搭建电机控制仿真模型, 电机的额定参数如表1所示。

表1 某永磁同步电机额定参数

Table 1 Rated parameters of a PMSM for rail transit

参数项目	参数值
输出电压/V	1 443
输出电流/A	555
电机转速/(r·min ⁻¹)	1 670
电机转矩/(N·m)	7 005
电机功率/kW	1 225
定子电阻/Ω	0.036
d轴电感/H	0.001
q轴电感/H	0.003
永磁体磁链/Wb	1.08
电机极数	8

针对永磁电机的额定工况进行电机TTSCF仿真, 仿真工况均为电机转速1 670 r/min, 额定输出转矩7 005 N·m。TTSCF仿真参数及仿真电流经DFT分析后所得的瞬时功率二次分量统计情况如表2所示。表2中不同电机对应的电流波形和瞬时功率图谱分析分别如图4~图8所示。

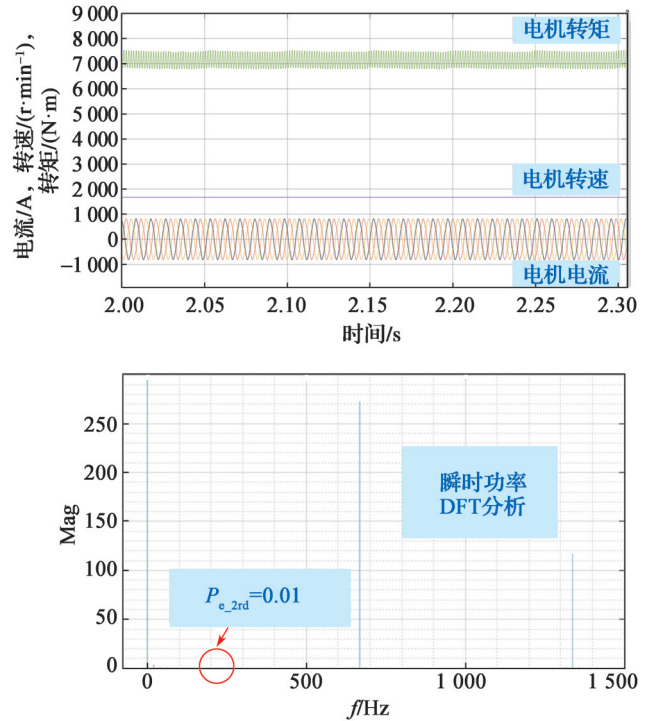


图4 正常电机电流波形及DFT分析

Fig. 4 Current waveform and DFT analysis of normal motor

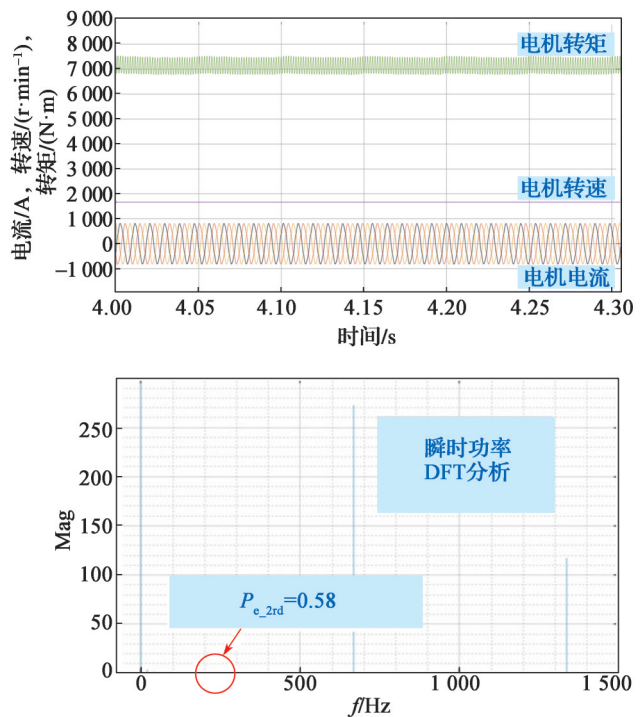


图5 匝短电机1电流波形及DFT分析

Fig. 5 Current waveform and DFT analysis of TTSCF motor 1

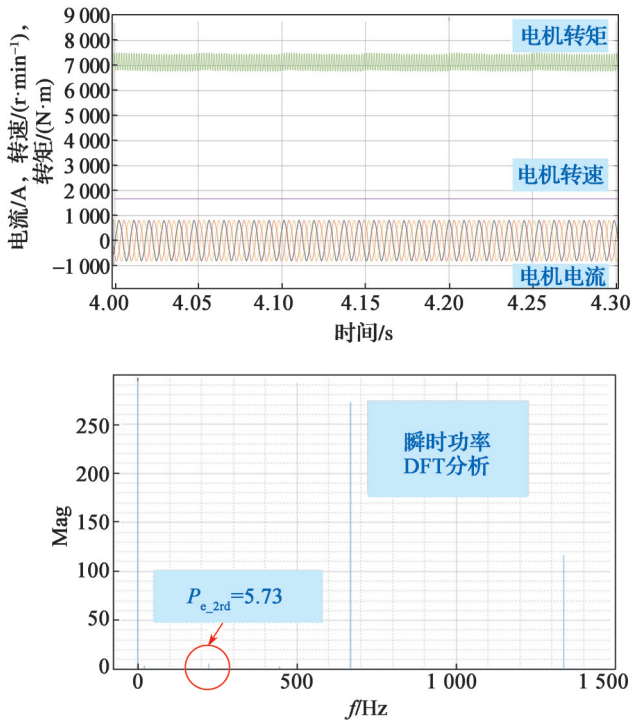


图6 匝短电机2电流波形及DFT分析

Fig. 6 Current waveform and DFT analysis of TTSCF motor 2

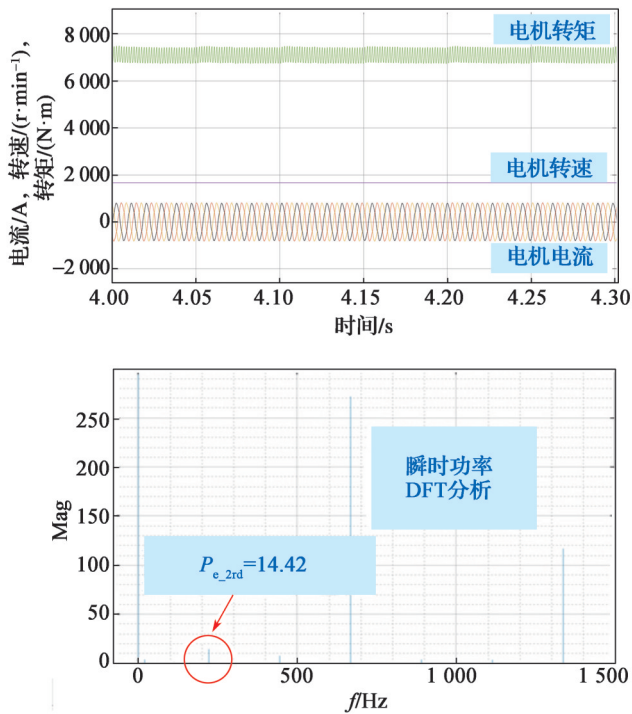


图7 匝短电机3电流波形及DFT分析

Fig. 7 Current waveform and DFT analysis of TTSCF motor 3

由仿真结果分析可知，随着 TTSCF 电机的故障程度不断增加，电机电流出现三相不平衡且不平衡程度不断增大；同时，对电机瞬时功率进行 DFT 分析，其二次分量 P_{e_2rd} 的幅值也不断增加，说明该值可明显表征永磁电机 TTSCF 的故障程度。

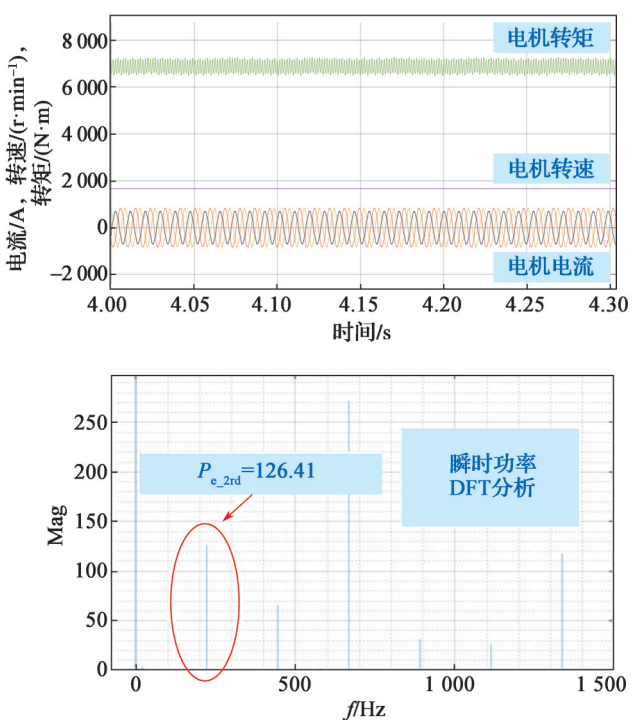


图8 匝短电机4电流波形及DFT分析

Fig. 8 Current waveform and DFT analysis of TTSCF motor 4

表2 TTSCF 仿真参数及二次分量统计

Table 2 TSCF simulation parameters and secondary component statistics

电机类型	故障系数 μ	短路电阻 R_f/Ω	二次分量 幅值 P_{e_2rd}/W
正常电机	0%	0	0.01
匝短电机 1	1%	0.10	0.58
匝短电机 2	1%	0.01	5.73
匝短电机 3	5%	0.10	14.42
匝短电机 4	5%	0.01	126.41

4 试验结果

以表 1 参数中的某轨道交通用永磁同步电机为试验对象搭建永磁电机 TTSCF 试验平台，对试验电机进行内部 TTSCF 改造，分别引出 1 匝、5 匝、6 匝外部抽头用于模拟不同程度 TTSCF。试验工况及瞬时功率的二次分量统计结果如表 3 所示。

表3 TTSCF 电机试验工况及二次分量统计

Table 3 TTSCF experiment conditions and secondary component statistics

电机类型	匝短匝 数/匝	外接短路 电阻/ Ω	故障 系数 μ	二次分量 幅值 P_{e_2rd}/W
正常电机	0	0	0%	3.96
匝短工况 1	1	1.42	0.7%	11.18
匝短工况 2	5	1.42	3.5%	20.93
匝短工况 3	6	1.42	4.2%	24.81

试验数据如图9~图12所示。

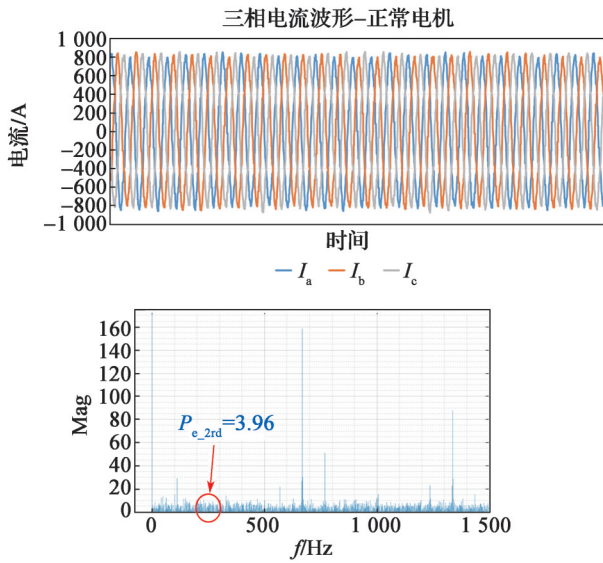


图9 正常电机电流波形图及瞬时功率图谱

Fig. 9 Current waveform and instantaneous power spectrum of normal motor

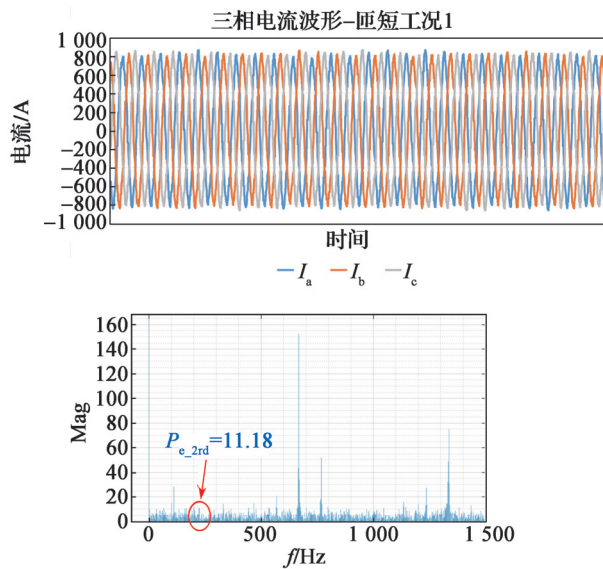


图10 匝短工况1电流波形及其瞬时功率图谱

Fig. 10 Current waveform and instantaneous power spectrum under TTSCF 1

由试验结果分析可以得到,随着TTSCF电机的故障程度不断增加,电机瞬时功率中的二次分量 P_{e_2rd} 的幅值也不断增加,与仿真结果接近,说明该二次分量 P_{e_2rd} 的幅值可用于表征永磁电机TTSCF的故障程度。

零序电流谐波检测法是一种基于电流谐波分析的电气设备故障诊断方法,主要用于检测电机、变压器等设备的TTSCF、绕组不对称等早期故障。其核心原理是监测三相系统中的零序电流谐波分量(尤其是3次谐波),利用其幅值或相位变化进行故障判断。根据试验采集的数据对三次谐波电流(third harmonic generation, THG)进行DFT分析,用于和本文所提方法进行对照试验。以A相电流为例进行对比分析,根据分析

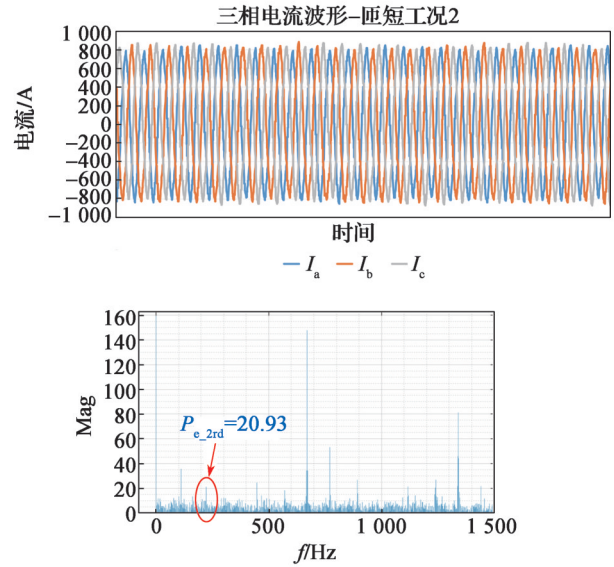


图11 匝短工况2电流波形图及瞬时功率图谱

Fig. 11 Current waveform and instantaneous power spectrum under TTSCF 2

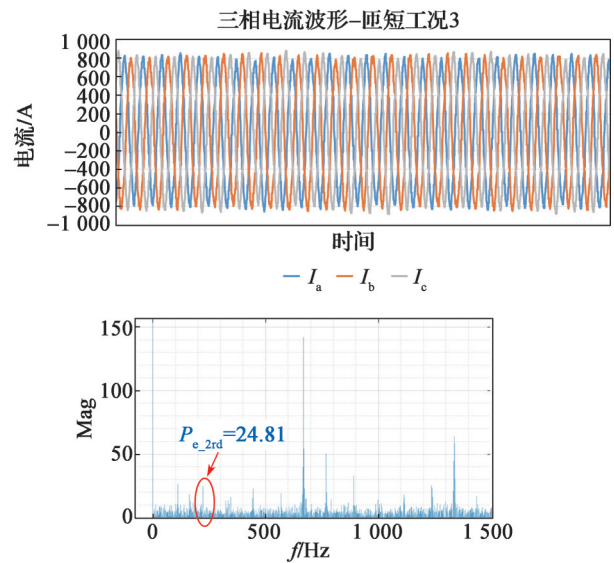


图12 匝短工况3电流波形图及瞬时功率图谱

Fig. 12 Current waveform and instantaneous power spectrum under TTSCF 3

可得图13~图16的试验结果。

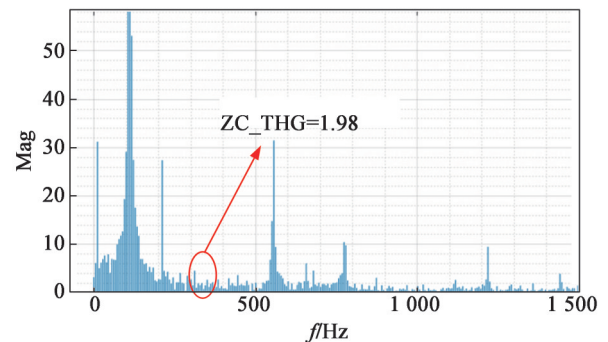


图13 正常工况的电流THG图谱

Fig. 13 Current THG spectrum of normal conditions

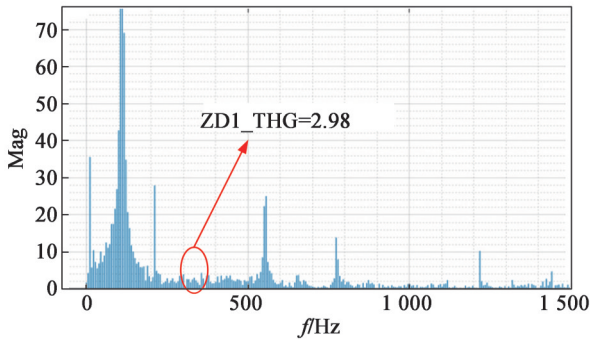


图 14 匝短工况 1 的电流 THG 图谱
Fig. 14 Current THG spectrum of TTSCF 1

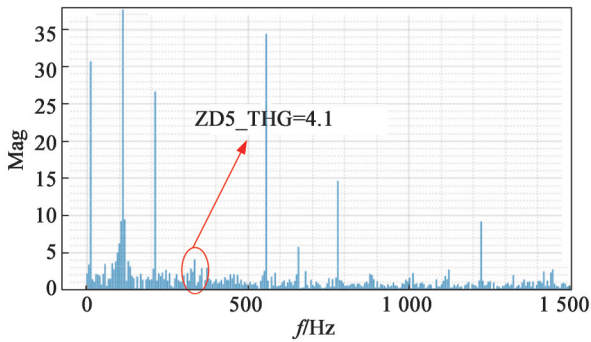


图 15 匝短工况 2 的电流 THG 图谱
Fig. 15 Current THG spectrum of TTSCF 2

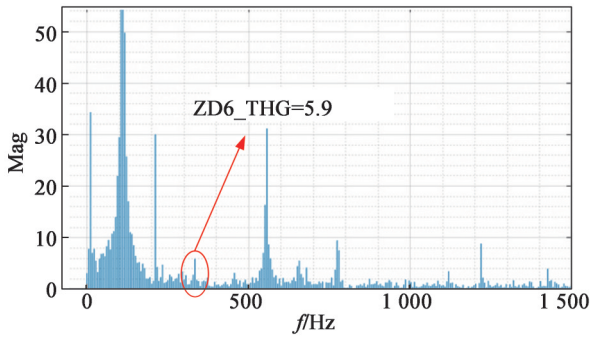


图 16 匝短工况 3 的电流 THG 图谱
Fig. 16 Current THG spectrum of TTSCF 3

为更直观地表征故障发生时的特征分量变化情况,定义故障时的特征分量与正常工况下的特征分量的比值为故障表征度 P_x ($P_x > 1$), 比值越大,则代表电机的故障程度越高。记故障时的瞬时功率二次谐波分量与正常工况下的瞬时功率二次谐波分量的比值为 P_{x1} ,故障时零序电流的三次谐波幅值与正常电机工况下的零序电流的三次谐波幅值的比值为 P_{x2} ,则 2 次试验结果的分析对比情况如表 4 所示。

两种不同方法的故障表征度对比图如图 17 所示。根据试验对比可知, 相对于传统零序电流谐波检测法通过三次电流谐波检测 TTSCF 故障, 本文所提基于瞬时功率的二倍频 TTSCF 预警方法在匝短工况下可呈现更为明显的匝短特征, 更不易被干扰因素淹没故障特征, 具有更为明显的监测效果。

为验证本文所提瞬时功率二倍频 TTSCF 预警方法

表 4 TTSCF 电机试验工况及故障表征度对比

Table 4 TTSCF experiment conditions and comparison of fault characterization degree

电机类型	故障系数 μ	基于瞬时功率的二倍频 TTSCF 预警方法		传统零序电流谐波检测法	
		二次分量幅值 P_{e_2nd}/W	故障表征度 P_{x1}	零序电流法 THG/A	故障表征度 P_{x2}
正常电机	0%	3.96	1.000 0	1.98	1.000 0
匝短工况 1	0.7%	11.18	2.823 2	2.98	1.505 1
匝短工况 2	3.5%	20.93	5.285 4	4.10	2.070 7
匝短工况 3	4.2%	24.81	6.265 2	5.90	2.979 8

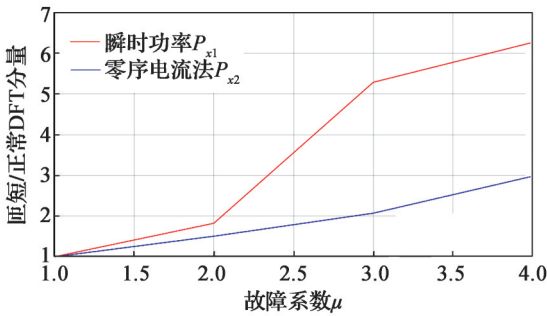


图 17 故障表征度对比图
Fig. 17 Comparison of fault characterization degree

在电机不同负载情况下的表现情况, 分别开展了匝短工况下的电机满载、半载和空载试验。试验结果如表 5 所示。

表 5 TTSCF 不同带载情况下的二次分量统计

Table 5 Amplitude statistics of secondary components for TTSCF under various load conditions

电机类型	满载_瞬时功率	半载_瞬时功率	空载_瞬时功率
	P_{e_2nd}/W	P_{e_2nd}/W	P_{e_2nd}/W
正常电机	3.96	4.68	0.40
匝短工况 1	11.18	4.89	0.22
匝短工况 2	20.93	9.73	2.62
匝短工况 3	24.81	11.87	5.31

由试验可以得出, 在永磁同步电机故障状态相同的情况下, 随着负载减小, 电机的瞬时功率二次分量的幅值逐渐降低。同时, 随着匝短严重程度的增大, 同一负载工况下的瞬时功率二次分量幅值呈增大趋势。因此, 在采用永磁同步电机瞬时功率二次分量判断电机匝短情况时, 可结合全速度下不同负载的二次分量含量, 分层分级设置预警门槛, 以排除负载变化带来的二次分量幅值变化, 避免匝间短路故障误判。

5 结束语

本文针对永磁同步电机匝间短路故障开展深入研究, 提出了一种基于电机瞬时功率二次分量的早期电

机匝间短路故障预警技术。仿真和试验结果均表明故障电机的瞬时功率二次分量可有效表征永磁电机匝间短路特征, 基于此可实现电机故障的早期预警。在匝间短路故障微弱及电机负载较小的条件下, 虽然二次分量较小, 且变化程度不大, 但仍然能够有效反映其匝短程度。建议在全速度工况下针对不同负载水平开展二次谐波含量分析, 建立分层级动态预警阈值。通过划分负载区间并分别设置二次谐波含量预警阈值, 可有效消除因负载波动引起的二次分量幅值变化对诊断结果的影响, 提升匝间短路故障判别的准确性。

本文方法也存在由电磁激励、控制策略及外部扰动等所带来故障诊断误判可能性。文献[26]指出SVPWM零矢量插入导致的5次、7次谐波经电机阻抗调制后, 也可能耦合出2倍频功率纹波; 如文献[27]指出, 当电网电压不平衡, 负序电压大于2%时, 该电压经四象限整流器传递至直流母线, 导致逆变器输出电压含2%负序分量, 进而生成2倍频功率纹波。因此, 电机瞬时功率二倍频脉动可作为匝间短路早期预警的有效“必要条件”, 但在外部干扰导致电机瞬时功率二倍频增加并且匝短程度非常低时, 建议同时增加多物理场联合判据, 如功率分量与转矩脉动的相位一致性, 电流谐波总失真度(THD)与功率分量之间的线性关系(若确定系数 $R^2 < 0.7$, 则可排除控制策略的影响), 轴系振动频谱中是否存在同频分量等, 以有效降低故障误判率。

参考文献:

- [1] 施以旋, 毛庆洲, 戴焕云, 等. 基于电机振动的动车组牵引逆变器故障诊断研究[J]. 机车电传动, 2024(2): 151-157.
SHI Yixuan, MAO Qingzhou, DAI Huanyun, et al. Research on fault diagnosis of EMU traction inverter based on motor vibration[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 151-157.
- [2] 李学明, 刘佩, 徐绍龙, 等. 列车牵引系统网侧过流故障实时诊断与保护策略研究[J]. 机车电传动, 2021(6): 81-86.
LI Xueming, LIU Kan, XU Shaolong, et al. Research on real-time diagnosis and protection strategy of line-side over-current fault of train traction system[J]. Electric drive for locomotives, 2021(6): 81-86.
- [3] 张博, 沈传文, 唐千龙, 等. 基于二倍频转矩脉动的异步电机定子匝间短路故障预测方法[J]. 电源学报, 2019, 17(1): 171-180.
ZHANG Bo, SHEN Chuanwen, TANG Qianlong, et al. Prediction method for stator winding inter-turn short-circuit fault of asynchronous motor based on torque double-frequency ripple[J]. Journal of power supply, 2019, 17(1): 171-180.
- [4] 柯思勤. 永磁电机故障诊断和容错技术概述[J]. 大功率变流技术, 2017(2): 11-16.
KE Siqin. Review on fault diagnosis and fault tolerant control for permanent magnet electrical machines[J]. High power converter technology, 2017(2): 11-16.
- [5] 樊静, 李俊卿, 王晓华, 等. 基于有限元法的汽轮发电机转子绕组匝间短路时的电磁场分析[J]. 大功率变流技术, 2009(5): 1-4.
FAN Jing, LI Junqing, WANG Xiaohua, et al. Electromagnetic field analysis of rotor winding turn-to-turn short circuit in steam turbine generator based on finite element method[J]. High power converter technology, 2009(5): 1-4.
- [6] 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): 3697-3707.
DING Shichuan, WANG Qingming, HANG Jun, et al. Inter-turn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine considering model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3697-3707.
- [7] 刘赫. 基于逆变器谐波的交流电机定子匝间短路故障诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
LIU He. Research on diagnosis of stator inter-turn short circuit faults in AC motors based on inverter harmonics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [8] 马建, 王建平, 孟德安, 等. 永磁同步电机故障诊断方法研究综述[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4): 104-115.
MA Jian, WANG Jianping, MENG Dean, et al. Review of fault diagnosis methods for permanent magnet synchronous motors[J]. Electric power engineering technology, 2024, 43(4): 104-115.
- [9] 郭博骋, 卢琴芬, 李焱鑫. 有铁心永磁直线电机初级匝间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1177-1188.
WU Bocheng, LU Qinfen, LI Yanxin. Analysis of inter-turn short circuit fault in iron-core permanent magnet linear machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1177-1188.
- [10] 张业成, 刘国海, 陈前. 基于电流波动特征的永磁同步电机匝间短路与局部退磁故障分类诊断研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1634-1643.
ZHANG Yecheng, LIU Guohai, CHEN Qian. Discrimination of interturn short-circuit and local demagnetization in permanent magnet synchronous motor based on current fluctuation characteristics[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2022, 37(7): 1634-1643.
- [11] GHANBARI T. Autocorrelation function-based technique for stator turn-fault detection of induction motor[J]. IET science measurement & technology, 2016, 10(2): 100-110.
- [12] 董涛, 程培源, 樊波, 等. 定子绕组诊断的分离电压和电流正负序分量法[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(1): 23-26.
DONG Tao, CHENG Peiyuan, FAN Bo, et al. Fault diagnosis of induction motor's stator winding by positive and negative sequence component of voltage and current separation method[J]. Journal of detection & control, 2011, 33(1): 23-26.
- [13] 胡小山, 胡尔峰, 孙新志, 等. 基于FPGA实时检测负序电

- 压和负序电流的方法[J]. 电工技术, 2024(12): 116-119.
- HU Xiaoshan, HU Erfeng, SUN Xinzhi, et al. FPGA-based real-time detection of negative sequence voltage and current components[J]. Electric engineering, 2024(12): 116-119.
- [14] 张鹏, 赵国新, 崔效源, 等. 匝间短路故障对永磁同步电机定子侧电流影响分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 78-87.
- ZHANG Peng, ZHAO Guoxin, CUI Xiaoyuan, et al. Analysis of the effect of inter-turn short-circuit fault on the stator current of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric machines & control application, 2024, 51(6): 78-87.
- [15] CIRA F, ARKAN M, GUMUS B. Detection of stator winding inter-turn short circuit faults in permanent magnet synchronous motors and automatic classification of fault severity via a pattern recognition system[J]. Journal of electrical engineering and technology, 2016, 11(2): 416-424.
- [16] SEERA M, LIM C P, ISHAK D, et al. Fault detection and diagnosis of induction motors using motor current signature analysis and a hybrid FMM - CART model[J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2012, 23(1): 97-108.
- [17] URRESTY J C, RIBA J R, ROMERAL L. Diagnosis of interturn faults in PMSMs operating under nonstationary conditions by applying order tracking filtering[J]. IEEE transactions on power electronics, 2013, 28(1): 507-515.
- [18] 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): 228-230.
- CHEN Yong, LIANG Hong, WANG Chengdong, 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(Suppl 1): 228-230.
- [19] 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 Jun, HU Qitao, DING Shichuan, 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.
- [20] PASQUALOTTO D, ZIGLIOTTO M. A comprehensive approach to convolutional neural networks-based condition monitoring of permanent magnet synchronous motor drives [J]. IET electric power applications, 2021, 15(7): 947-962.
- [21] BRIZ F, DEGNER M W, GARCIA P, et al. High-frequency carrier-signal voltage selection for stator winding fault diagnosis in inverter-fed AC machines[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, 55(12): 4181-4190.
- [22] 黄金金. 基于注入法的电动汽车永磁同步电机故障诊断技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HUANG Jinjin. Research on fault diagnosis technology of vehicle permanent magnet synchronous motor based on injection method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [23] 王涛, 刘庆飞. 纯延时滤波器提取高频注入响应在无位置传感器 IPMSM 系统中的应用[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 125-134.
- WANG Tao, LIU Qingfei. Application of time-delay filter based high-frequency signal injection to sensorless IPMSM system[J]. Journal of power supply, 2018, 16(1): 125-134.
- [24] 张波, 葛琼璇, 王晓新, 等. 基于瞬时功率的三电平 ANPC 变流器开路故障检测方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4070-4078.
- ZHANG Bo, GE Qiongquan, WANG Xiaoxin, et al. Fault diagnosis for open circuit switch based on instantaneous power for three-level ANPC converter[J]. High voltage engineering, 2017, 43(12): 4070-4078.
- [25] LALE T, GÜMÜŞ B. A new approach based on electromechanical torque for detection of inter-turn fault in permanent magnet synchronous motor[J]. Electric power components and systems, 2021, 49(18/19): 1499-1511.
- [26] 陈杰, 章新颖, 闫震宇, 等. 基于虚拟阻抗的逆变器死区补偿及谐波电流抑制分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1671-1680.
- CHEN Jie, ZHANG Xinying, YAN Zhenyu, et al. Dead-time effect and background grid-voltage harmonic suppression methods for inverters with virtual impedance control [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(8): 1671-1680.
- [27] 廖勇, 吴兴旺, 刘刃. 电网不平衡时双馈感应发电机定子负序谐波电流抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 26-32.
- LIAO Yong, WU Xingwang, LIU Ren. Suppression for negative sequence and harmonic current of a doubly-fed induction generator stator in unbalanced grid[J]. Automation of electric power systems, 2013, 37(19): 26-32.

Real-time warning for turn-to-turn short-circuits in PMSM
based on instantaneous power

YANG Fan¹, ZHONG Yong^{1,2}, HU Liang¹, WANG Yue¹, FENG Ling¹

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motors (PMSM) have garnered widespread application in rail transit, wind power generation, industrial drives, electric vehicles, and other fields, due to their advantages such as compact size, high efficiency, and high power density. However, owing to the complexity of PMSM manufacturing and complex operating environments, stator windings are susceptible to turn-to-turn short-circuit faults (TTSCF) during operation. To address this issue, this paper proposes a real-time warning technique for turn-to-turn short-circuit faults in PMSMs based on instantaneous motor power. During motor operation, the instantaneous power is analyzed using the discrete Fourier transform (DFT), and the amplitude of its secondary component is extracted to characterize turn-to-turn short-circuit faults. This technique was analyzed and validated through simulations and experiments, with results demonstrating its effectiveness. The proposed technique enhances the reliability and real-time performance of fault diagnosis for PMSMs and provides valuable insights for the technical design of active safety features on trains.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; turn-to-turn short circuit; instantaneous power; discrete Fourier transform; simulation