

三余度永磁同步电机绕组匝间短路故障诊断方法



徐金全,田新磊,郭宏

北京航空航天大学, 北京 100083

摘要:机载作动系统可靠性是保障飞机飞行性能和飞行安全的重要前提,为了提升机载电力作动系统用三余度永磁同步电机系统可靠性,针对其常见的绕组匝间短路故障(ITSCF),本文提出一种基于高频谐波电流的在线故障诊断方法。通过电机绕组 ITSCF 数学模型,明确了故障后旋转坐标系下交直流电流的典型高频脉宽调制(PWM)谐波故障特征;综合分析交直流谐波电流对瞬态工况扰动的鲁棒性,选择直轴高频谐波电流周期有效值作为诊断特征;为了消除各余度电流固有谐波的影响,提出了基于三余度谐波电流平衡度的故障诊断方法;最后设计了故障诊断算法,通过带通滤波器进行高频谐波电流提取,并采用周期有效值计算实现谐波电流量化,最终通过三余度平衡诊断表实现故障余度识别。通过仿真模型验证了诊断算法的有效性,为提升机载电力作动系统可靠性提供借鉴。

关键词:电力作动系统;三余度永磁同步电机;故障诊断;匝间短路故障;PWM 谐波

中图分类号:V242.44

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.08.011

随着多电/全电飞机的快速发展,机载伺服作动系统正逐渐由多能源形式作动系统向单一电力作动系统发展。电力作动系统(包括电静液作动器(EHA)和机电作动器(EMA))的广泛应用大大简化了飞机的二次能源系统,能显著降低维护成本,提高能源利用率,已成为未来飞机的重要发展趋势^[1-4]。

作为电力作动器系统的核心部件,伺服电机系统对其性能和可靠性有决定性影响。高可靠永磁同步电机系统以其高可靠、高效率、高功率密度等优点成为伺服电机系统的首选^[5]。为了提高系统任务可靠性,永磁同步电机系统通常采用多相结构,多相结构间互为余度关系,从而使系统具备故障重构和容错能力^[6]。余度永磁同步电机系统是基于传统三相永磁同步电机提出的,其绕组由多组三相定子绕组按照一定的空间结构排列构成,各余度采用三相桥逆变器结构,其控制策略也可以直接由三相永磁同步电机扩展而来,控制结构简单直观。当某相绕组发生故障时,余度永磁同步电机系统通常切除故障相所在的整组三相绕组,剩余余度的三相绕组可继续运行,故障前后电机

始终保持对称运行。

尽管余度电机具有一定的故障重构和容错能力,然而由于转子永磁体的存在,当绕组发生短路故障,特别是初期的绕组匝间短路故障(ITSCF),会导致故障匝中产生大短路电流造成局部温升,进而造成故障蔓延,如果不进行及时诊断和故障隔离措施,可能会造成系统瘫痪,因此,ITSCF 诊断对于余度电机系统至关重要^[7-8]。现在的电机定子绕组 ITSCF 诊断方法可分为基于参数估计、基于高频注入以及基于电机电流特征分析的故障诊断。其中,基于参数估计的方法可以通过监测绕组反电势^[9]、电感^[10]以及电阻^[11]等参数实现故障识别,结构简单,但对环境或工况扰动的鲁棒性较差。基于高频谐波注入^[12]的方法利用 ITSCF 后的阻抗变化,通过向电机注入高频谐波电压,采集高频谐波电流实现故障诊断,显著提高了诊断算法鲁棒性,但由于额外高频信号的注入,降低了系统的运行性能。而基于电机电流特征分析的诊断算法通过快速傅里叶变换^[13]、小波变换^[14]、希尔伯特-黄变换^[15]等时域或频域信号处理方法,从定子电流中提取故障特征。由于该方法的非

收稿日期: 2023-05-31; 退修日期: 2023-06-25; 录用日期: 2023-07-11

基金项目: 航空科学基金(201907051002)

引用格式: Xu Jinquan, Tian Xinlei, Guo Hong. Inter-turn short-circuit fault diagnosis method for triple-redundancy PMSM system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(08): 86-94. 徐金全, 田新磊, 郭宏. 三余度永磁同步电机绕组匝间短路故障诊断方法 [J]. 航空科学技术, 2023, 34(08): 86-94.

侵入性、易于实现且不依赖于精确数学模型等优点,现已成为最常见的ITSCF诊断方法。

现有的研究通常是针对单三相电机,对于多余度电机各余度之间的耦合影响使得故障识别比较困难,且基于高频谐波电流提取的方法存在阈值选取困难的问题,针对以上难点,本文对三余度永磁同步电机绕组ITSCF诊断进行研究,提出了基于 d 轴高频脉宽调制(PWM)谐波电流的诊断算法,并基于各余度之间的平衡度实现了故障余度识别,为提升机载电力传动系统可靠性提供理论基础。

1 电机系统ITSCF模型

1.1 三余度电机系统

为了提高电力传动系统的容错重构能力,伺服电机采用三余度永磁同步电机,由三套对称三相绕组组成,且三套绕组之间的中性点隔离,互差 $2\pi/9$,每套绕组分别由三相全桥电路独立控制,电机主功率电路如图1所示。为了实现三套绕组之间互为余度,提高电机系统可靠性,采用三组全桥电路对每个基本单元进行单独控制,当一套绕组故障后切除该余度实现故障隔离。

电机系统双闭环控制框图如图2所示,电流环采用三通道控制器分别对三组绕组进行单独控制,由于永磁同步电机永磁体采用表贴式结构,因而电流环采用传统的 d 轴给定电流 $i_d=0$ 的控制策略,三余度的 q 轴电流由外转速环输出给定。然后,采用空间矢量脉宽调制(SVPWM)驱动控制策略生成驱动信号,实现电机系统的闭环控制。

定义各余度坐标关系如图3所示,其中 ABC 为第一组

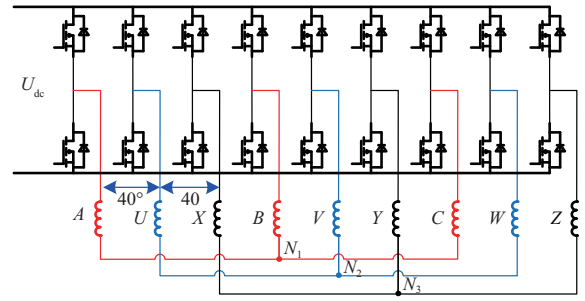


图1 三余度电机系统

Fig.1 Triple redundancy machine system

绕组, UVW 为第二组绕组, XYZ 为第三组绕组。三套绕组分别采用互差 $2\pi/9$ 的静止坐标系 $\alpha_1-\beta_1$ 、 $\alpha_2-\beta_2$ 和 $\alpha_3-\beta_3$ 进行矢量变换,静止坐标系Clarke变换矩阵分别为

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

$$T_{\alpha\beta 2} = e^{j\frac{2\pi}{9}} T_{\alpha\beta 1}$$

$$T_{\alpha\beta 3} = e^{j\frac{4\pi}{9}} T_{\alpha\beta 1}$$

1.2 ITSCF模型

当绕组线圈中的不同匝由于绝缘击穿形成接触时,就会发生ITSCF,当绝缘退化严重时,接触电阻较小,从而通过短路电阻形成短路路径,在极端情况下,短路电阻为0。以三余度中的第一组为例进行ITSCF建模,等效电路模型如图4所示。

以 A 相绕组ITSCF为例,当发生故障后,绕组分为两部分,分别为被短路电阻 r_f 短接的ITSCF部分和剩余正常部分,均由电阻、电感和反电势构成。此时,电机故障余度数学模型为

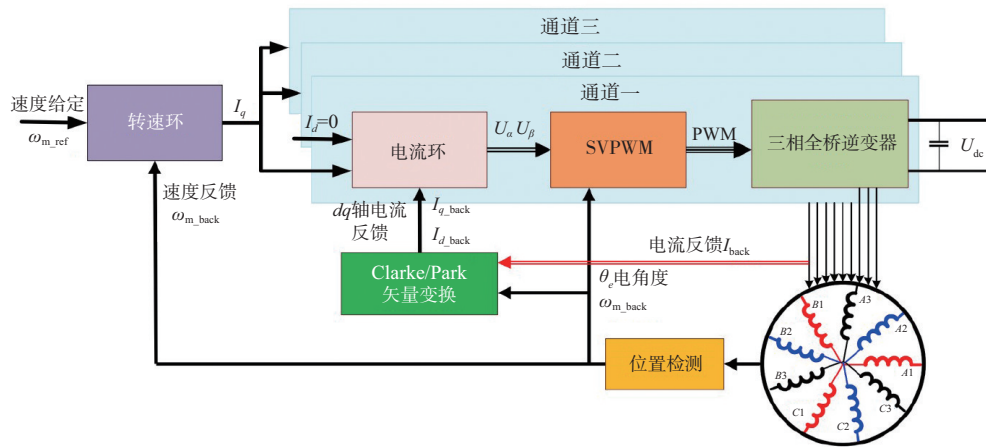


图2 三余度电机双闭环控制框图

Fig.2 Dual closed loop control scheme of triple redundancy machine

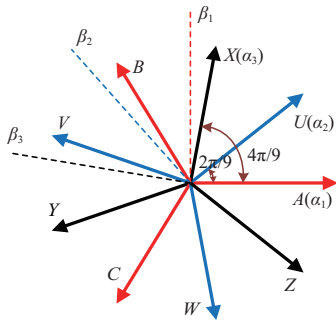


图3 三冗余坐标系

Fig.3 Triple redundant coordinates

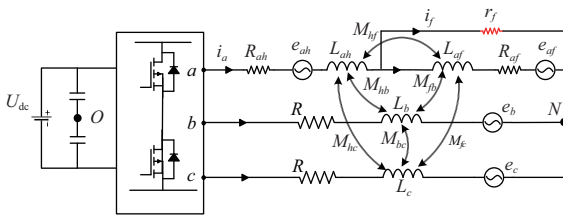


图4 ITSCF等效电路和参数

Fig.4 Equivalent circuit and parameters under inter-turn short-circuit fault

$$\begin{bmatrix} u_{ah} \\ u_{af} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ah} & & & \\ & R_{af} & & \\ & & R & \\ & & & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_a - i_f \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ah} & M_{ahaf} & M_{ahb} & M_{ahc} \\ M_{ahaf} & L_{af} & M_{afb} & M_{afc} \\ M_{ahb} & M_{afb} & L_b & M_{bc} \\ M_{ahc} & M_{afc} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_a - i_f \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ah} \\ e_{af} \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $u_{af}, R_{af}, L_{af}, e_{af}$ 分别为短路部分的电压、电阻、电感和反电势; $u_{ah}, R_{ah}, i_a, L_{ah}, e_{ah}$ 分别为非故障部分电压、电阻、电流、电感和反电势; r_f 和 i_f 分别为短路电阻和电流; $u_{bn}, u_{cn}, R, i_b, i_c, L_b, L_c, e_b, e_c$ 分别为 B、C 相绕组端电压、电阻、电流、电感和反电势; $M_{xy} (x, y \in \{ah, af, b, c\})$ 表示各部分绕组之间的互感, t 为时间。

定义短路匝数与绕组总匝数之比为 $\mu \in (0, 1)$, 电机故障绕组各部分参数可表示为^[16]

$$\begin{aligned} R_{ah} &= (1 - \mu)R \\ R_{af} &= \mu R \\ L_{ah} &= (1 - \mu)^2 L_a \\ L_{af} &= \mu^2 L_a \\ e_{ah} &= (1 - \mu)e_a \\ e_{af} &= \mu e_a \end{aligned} \quad (3)$$

进而, 故障电机各段绕组之间的互感和电感可表示为

$$\begin{aligned} L_{ah} + 2M_{ahaf} + L_{af} &= L_a \\ M_{ahb} + M_{afb} &= M_{ab} \\ M_{ahc} + M_{afc} &= M_{ac} \\ M_{ahaf} + L_{af} &= \mu L_a \\ M_{afb} &= \mu M_{ab} \\ M_{afc} &= \mu M_{ac} \end{aligned} \quad (4)$$

又 $u_{an} = u_{ah} + u_{af}$, 将式(3)和式(4)代入式(2)可得故障电机在静止坐标系下的简化数学模型

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & & \\ & R & \\ & & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a - \mu i_f \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a - \mu i_f \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

在同步旋转坐标系下, 故障电机数学模型可表示为^[17-18]

$$\begin{aligned} u_{df} &= R(i_d - \frac{2}{3}\mu i_f \cos \theta_e) + L_d \frac{d(i_d - \frac{2}{3}\mu i_f \cos \theta_e)}{dt} - \\ &\quad \omega_e L_q (i_q - \frac{2}{3}\mu i_f \sin \theta_e) \\ u_{qf} &= R(i_q + \frac{2}{3}\mu i_f \sin \theta_e) + L_q \frac{d(i_q + \frac{2}{3}\mu i_f \sin \theta_e)}{dt} - \\ &\quad \omega_e L_d (i_d + \frac{2}{3}\mu i_f \cos \theta_e) - \omega_e \psi_f \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $u_d, u_q, L_d, L_q, i_d, i_q$ 分别为交直流电压、电感和电流; ψ_f 表示永磁磁链。

由式(6)可知, 在 ITSCF 状态下, 由故障引起的电机 dq 轴电流变化量为

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= -\frac{2}{3}\mu i_f \cos \theta_e \\ \Delta i_q &= \frac{2}{3}\mu i_f \sin \theta_e \end{aligned} \quad (7)$$

由于在 PWM 斩波过程中, 会向绕组注入高频谐波电压, 进而产生高频谐波电流, 正常运行条件下, 该谐波幅值与调制方式和绕组阻抗相关, 且相对较小, 为了便于建模, 忽略非故障相对故障相在该高频段的耦合影响, 则故障相短路环电流可表示为^[19]

$$i_f = \mu \frac{u_{an}}{r_f + (\mu - \mu^2)R} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)可得由 ITSCF 引起的短路电流映射在交直流电流的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= -\frac{2}{3}\mu^2 \frac{u_{an}}{r_f + (\mu - \mu^2)R} \cos \theta_e \\ \Delta i_q &= \frac{2}{3}\mu^2 \frac{u_{an}}{r_f + (\mu - \mu^2)R} \sin \theta_e \end{aligned} \quad (9)$$

在PWM控制下,电机故障相端电压表达式为^[20]

$$u_{an} = V_{dc} + V_{dc} M \cos(\omega_e t + \theta_e) + \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} J_0\left(m \frac{\pi}{2} M\right) \sin\left(m \frac{\pi}{2}\right) \cos[m(\omega_e t + \theta_e)] + \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sum_{\substack{n=-\infty \\ (n \neq 0)}}^{\infty} \frac{1}{m} J_n\left(m \frac{\pi}{2} M\right) \sin\left[(m+n) \frac{\pi}{2}\right] \times \cos[m(\omega_e t + \theta_e) + n(\omega_e t + \theta_e)] \quad (10)$$

式中, V_{dc} 为直流电压, M 为PWM调制比, ω_e 为载波电角速度, m 为傅里叶分解中载波的索引变量, n 为基带的索引变量, J_0 和 J_n 表示第0和第 n 个贝塞尔函数。由式(10)可知, 相电压包括直流偏置、基波电压、PWM载波谐波电压以及载波边带谐波电压。由于基波频段阻抗较大, 高次PWM谐波频率较高不易于在线提取, 因而选择PWM载波基波频段作为故障特征频段进行研究。结合式(9)和式(10), 交直流PWM谐波电流可表示为

$$\Delta i_d = -\frac{2}{3} \mu^2 \frac{4V_{dc}}{\pi} \frac{J_0\left(\frac{\pi}{2} M\right) \cos(\omega_e t + \theta_e)}{r_f + (\mu - \mu^2)R} \cos\theta_e \quad (11)$$

$$\Delta i_q = \frac{2}{3} \mu^2 \frac{4V_{dc}}{\pi} \frac{J_0\left(\frac{\pi}{2} M\right) \cos(\omega_e t + \theta_e)}{r_f + (\mu - \mu^2)R} \sin\theta_e$$

由式(11)可知, 发生ITSCF后, 在交直流电流正常运行的基础上, 会叠加一个由PWM谐波电压产生的高频谐波电流, 且该谐波电流同时与载波和基波频率相关。基于该谐波电流即可实现电机绕组ITSCF在线诊断。

2 诊断算法

根据前述电机绕组ITSCF数学模型分析, 理论上, 映射在交直流轴上的PWM谐波电流均可以作为三余度永磁同步电机绕组ITSCF特征。然而, 由图2可知, 电机的三个余度控制均采用同一个交轴电流, 因而当任意余度发生故障并造成转速波动时, 均会对交轴电流产生影响, 进而对非故障电机电流波形产生影响, 且交轴电流受负载和转速等工况的影响较大, 故障诊断鲁棒性较差, 因而选择直轴高频谐波电流作为故障特征进行故障诊断。

根据式(11)可知, 交轴高频PWM谐波电流除了与载波频率相关, 还随基波频率正弦变化, 因此在设计故障特征时, 首先采取带通滤波器对直轴电流进行PWM谐波电流提取, 然后以基波电流周期为基准对谐波电流进行周期有效值计算

$$I_{di_bp_rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_0}^{T_0+T} I_{di_bp}^2 dt} \quad i \in (1, 2, 3) \quad (12)$$

式中, I_{di_bp} 表示第 i 余度经过滤波获取的 d 轴PWM谐波电流, T_0 表示周期有效值计算初始时间, T 表示电机基波电流周期。

在实际控制中, 电机正常运行时, 由于PWM斩波注入的高频谐波电压同样会产生幅值较小的高频谐波电流, 诊断阈值选取比较困难, 为了消除原始谐波电流的影响, 对三余度直轴谐波电流周期有效值进行平衡度计算, 当任意余度发生ITSCF后, 故障余度交轴谐波电流包含原始谐波电流和由ITSCF引起的谐波电流, 而非故障余度则只包含原始谐波电流, 因此设计故障诊断指标为

$$\begin{cases} FI_1 = |I_{d2_bp_rms} - I_{d3_bp_rms}| \\ FI_2 = |I_{d1_bp_rms} - I_{d3_bp_rms}| \\ FI_3 = |I_{d1_bp_rms} - I_{d2_bp_rms}| \end{cases} \quad (13)$$

通过式(13)即可消除原始谐波电流对故障诊断阈值选取的影响, 理想情况下, 基于式中三个故障特征值的正负性即可实现故障余度识别, 但在实际运行中, 各相电流并非严格对称, 为了降低误警率, 需选取合适的诊断阈值 I_{thres} , 阈值的选取对诊断性能至关重要, 较小的阈值可以提高故障诊断的快速性和灵敏度, 从而可以诊断更早期的ITSCF, 但同时也会带来误警率高的问题; 相反, 阈值选取较大可以降低误警率, 但灵敏度会随之下降。由于故障特征值不仅与短路匝数和短路电阻相关, 还与电机电阻、母线电压等参数相关, 因此, 在实际应用中需综合考虑电机参数、工况以及可靠性要求等因素, 根据试验和工程经验对灵敏度和误警率进行折中来选取合适的阈值。

在确定阈值后, 将各余度的故障特征值与阈值比较, 可产生故障标志

$$F_i = \begin{cases} 1, & FI_i \geq I_{thres} \\ 0, & FI_i < I_{thres} \end{cases} \quad (14)$$

根据各余度的故障标志即可实现ITSCF的诊断和识别, 见表1。

表1 故障组识别查表

Table 1 Fault redundancy identification table

故障组	F_1	F_2	F_3
第一组	0	1	1
第二组	1	0	1
第三组	1	1	0

综上, 本文提出的三余度电机绕组ITSCF诊断方法流程如图5所示。首先, 对三余度直轴电流进行带通滤波, 获取PWM谐波电流; 然后采用周期有效值计算对谐波电流进

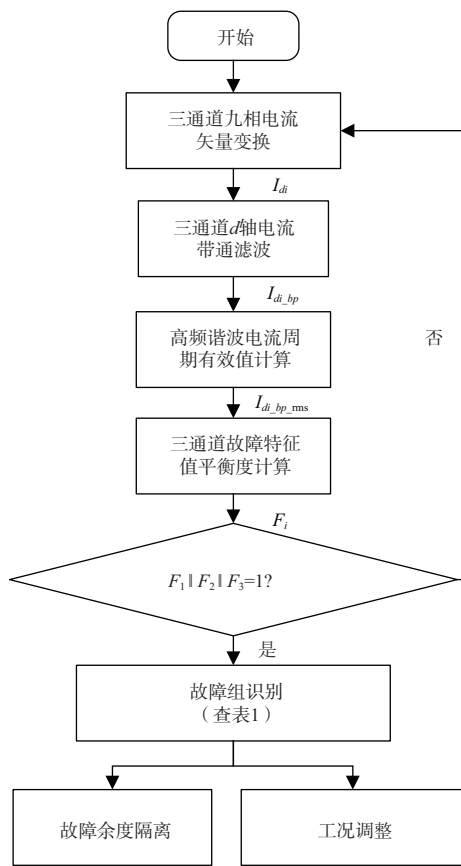


图5 故障诊断流程

Fig.5 Fault detection flowchart

行量化;利用余度之间的谐波差异消除正常状态下的谐波影响,并构建故障诊断指标;利用诊断指标进行故障诊断,并通过查表进行故障余度识别。

3 仿真验证

为了验证本文所提出的ITSCF诊断算法的有效性,在ANSYS环境中搭建了三余度永磁同步电机系统仿真模型,电机主要参数见表2。故障相绕组的仿真模型如图4所示,通过改变故障相的短路绕组与剩余绕组的电阻、电感以及反电势与正常参数的比值,来模拟不同故障程度 μ 。在电机系统控制中,PWM载波频率为 $f_s = 20\text{kHz}$,带通滤波器的中心频率设置为 20kHz ,通带宽度设置为 10kHz 。

3.1 额定工况下的故障诊断

为了验证电机不同余度发生不同程度的ITSCF的诊断性能,在额定工况下,以第一组和第二组绕组ITSCF为例进行仿真,由于电机转速较高,在计算谐波电流周期有效值时,为了降低特征值脉动,采用两个周期的有效值作

表2 电机主要参数

Table 2 Main parameters of machine

参数/单位	数值	参数/单位	数值
母线电压/V	540	相电阻/ Ω	0.464
额定转速/(r/min)	15000	d轴电感/mH	0.27
额定转矩/(N·m)	20	q轴电感/mH	0.27
永磁磁链/Wb	0.03623	极对数	3

为故障特征值,诊断阈值是综合考虑诊断快速性和可靠性进行选取,这里设置为0.25,仿真结果如图6和图7所示。

由图6可知,在0.075s时,第一组的A相绕组发生故障程度为 $\mu = 0.25$ 的ITSCF后,电机转速和转矩均会产生波动,且各余度电流波形发生畸变,导致交轴电流 i_q 产生较大脉动,在此基础上,第一组的三相电流高频谐波幅值变大,映射在直轴电流 i_d 上表现为周期性高频谐波,如图6(c)所示。经过高频谐波提取和周期有效值计算,故障特征值如图6(d)所示,故障发生后,部分特征值逐渐增大至约0.75后逐渐平稳,当大于阈值时,则相应的故障标志置“1”。图6(e)为故障标志,发生ITSCF后,故障标志由“000”变为“011”,通过查表1可以识别为第一组故障,且诊断时间仅2ms。

同样地,当第二组绕组发生 $\mu = 0.125$ 的ITSCF后,仿真结果如图7所示。由图可知,在0.075s故障后,电机转速、转矩以及交直流电流同样会产生脉动,故障特征值波形如图7(d)所示,增大到0.65附近逐渐平稳,但相较于 $\mu = 0.25$ 时,转速、转矩以及电流脉动幅值减小,特征值也有所下降,从而验证了式(11)中随故障程度加重、故障特征值增大的结论。第二组故障后,故障标志如图7(e)所示,由“000”变为“101”,通过查表即可实现故障余度识别。

额定工况下的故障诊断结果表明,当不同余度发生匝间短路故障后,本文所提出的诊断方法不仅能够准确识别故障余度,还可以根据故障特征值判断故障程度。另外,仿真结果表明,故障发生后,在两个电周期内即可实现故障诊断和识别,该快速性取决于诊断阈值选取时对故障诊断灵敏度和“误警”率的综合考量。

3.2 负载扰动下的诊断性能

图8和图9分别为电机转速和负载转矩阶跃变化下的诊断仿真结果。由图可知,在电机转速阶跃变化和电机转矩阶跃变化瞬态工况下,尽管在瞬态过渡期间电机转速、转矩以及相电流均会产生一定波动,且在d轴电流中同样会产生一定的脉动,但通过诊断算法中各余度之间的平衡度

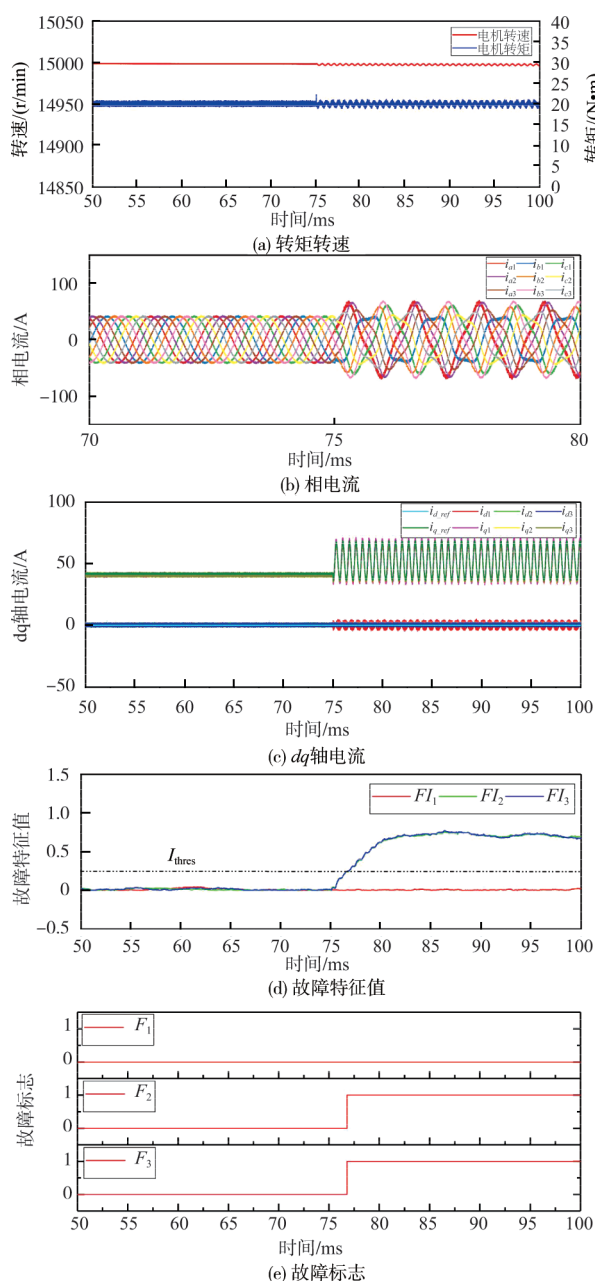


图6 第一组绕组ITSCF诊断结果

Fig.6 Fault diagnosis results of ITSCF in first set winding

计算,有效地消除了脉动干扰。诊断结果显示,在瞬态过程中,故障特征值均未发生明显变化,故障标志也未出现误诊断,从而验证了所提出的故障诊断算法在转速和负载阶跃扰动下的强鲁棒性。

4 结束语

本文针对航空电作动系统用的三余度永磁同步电机,提出了一种基于高频谐波电流的电机绕组匝间短路故障诊

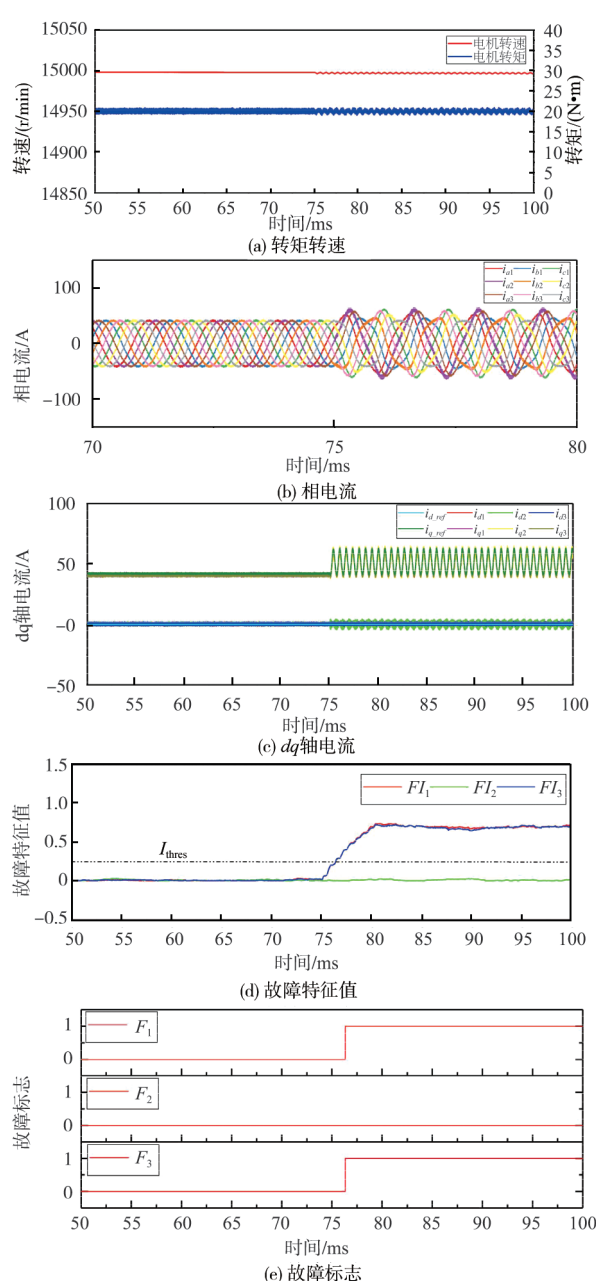


图7 第二组绕组ITSCF诊断结果

Fig.7 Fault diagnosis results of ITSCF in second set winding

断方法。首先,搭建了三余度电机数学模型,分析了正常运行与故障运行状态下电机绕组谐波电流以及交直流谐波电流特征变化。然后提出了基于直流电流高频谐波周期有效值的诊断算法,具体包括PWM高频谐波电流提取、谐波电流量化、诊断特征值计算以及故障余度识别等。通过建模仿真验证,结果表明,该故障诊断方法能够快速、准确地实现故障诊断和故障余度识别,且对电机转速、转矩阶跃变化等工况引起瞬态扰动具有强鲁棒性。

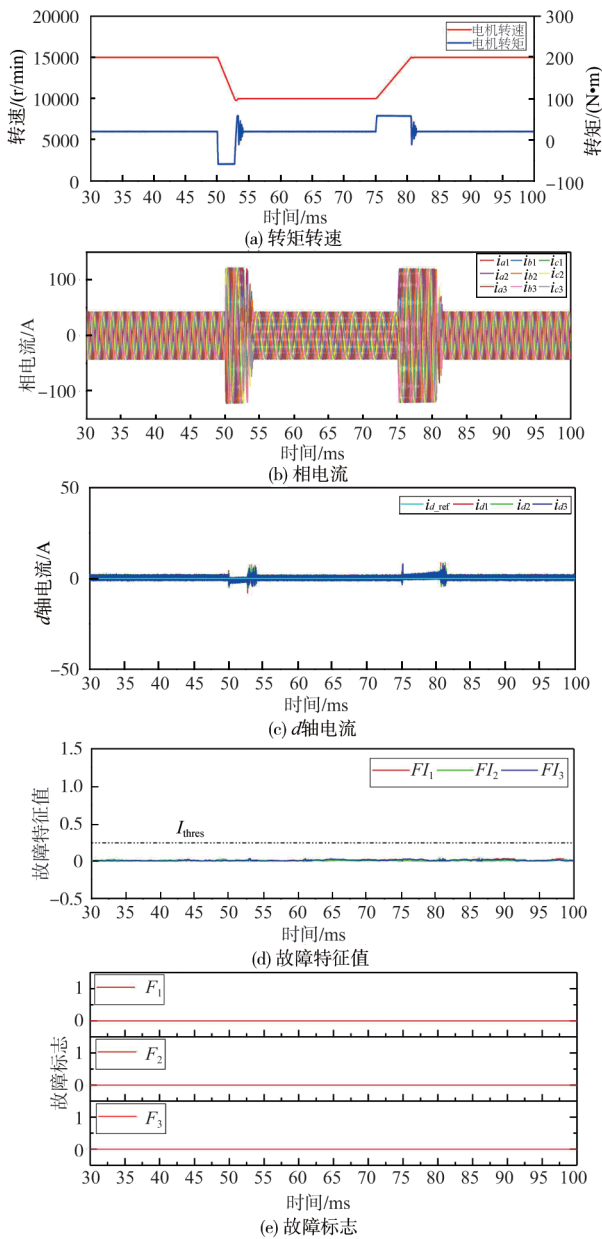


图8 转速变化瞬态下的诊断性能

Fig.8 Diagnosis performance in transient operation condition of speed

参考文献

- [1] 祁晓野,付永领,王占林. 功率电机载作动系统方案分析[J]. 北京航空航天大学学报,1999(4):56-60.
- Qi Xiaoye, Fu Yongling, Wang Zhanlin. Scheme analysis of power by wire airborne actuation systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25 (4) :56-60. (in Chinese)

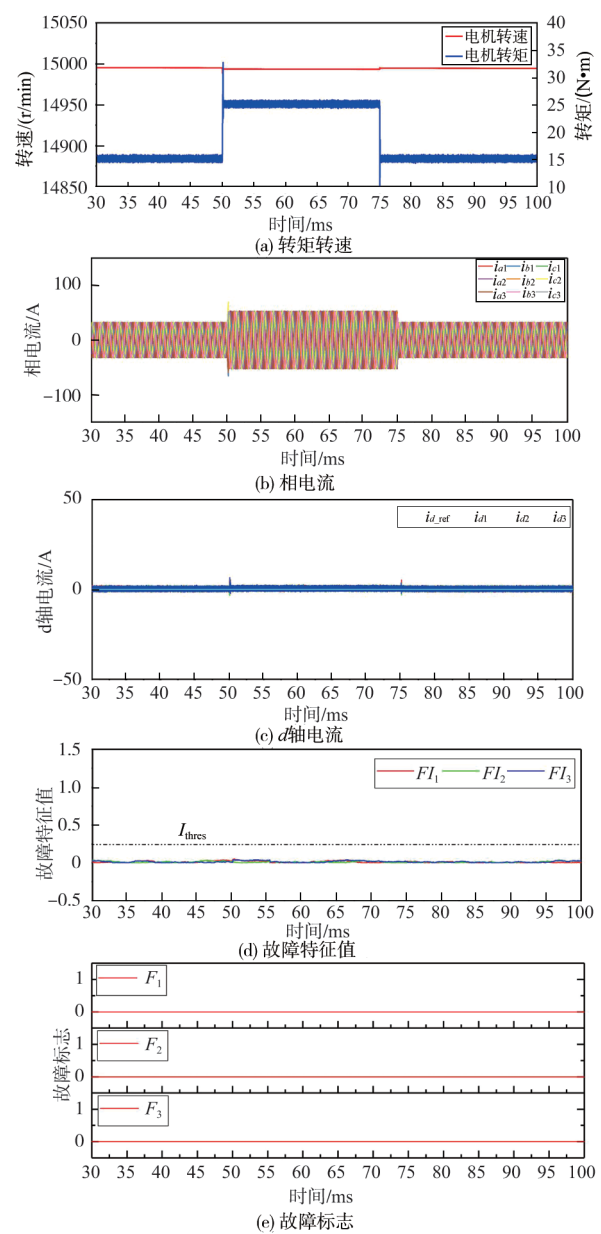


图9 转矩变化瞬态下的诊断性能

Fig.9 Diagnosis performance in transient operation condition of torque

- [2] 李军,付永领,王占林,等. 一种新型机载一体化电液作动器的设计与分析[J]. 北京航空航天大学学报,2003(12):1101-1104.
- Li Jun, Fu Yongling, Wang Zhanlin, et al. Design and analysis of airborne integrated electro- hydrostatic actuator[J]. Journal of System Simulation, 2003,(12) : 1101-1104. (in Chinese)
- [3] 邓景辉. 直升机技术与展望[J]. 航空科学技术,2021,32 (1):10-16.
- Deng Jinghui. Development and prospect of helicopter technol-

- ogy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 10-16. (in Chinese)
- [4] 刘铭, 黄纯洲, 李勤. 飞机机载机电系统多电技术的发展现状[J]. 航空科学技术, 2005(6): 10-13.
- Liu Ming, Huang Chunzhou, Li Qin. Subsystems development on more-electric aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2005(6): 10-13. (in Chinese)
- [5] 郝振洋, 胡育文, 黄文新. 电力作动器中永磁容错电机及其控制系统的发展[J]. 航空学报, 2008(1): 149-158.
- Hao Zhenyang, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Development of fault tolerant permanent magnet machine and its control system in electro-mechanical actuator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008(1): 149-158. (in Chinese)
- [6] 刘文虎, 郑继敏, 文军. 高可靠航天多冗余度伺服技术发展综述[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(9): 5.
- Liu Wenhui, Zheng Jimin, Wen Jun. A summary of development of highly reliable space redundant servo system[J]. Automation & Instrumentation, 2020(9): 5. (in Chinese)
- [7] 艾凤明, 梁兴壮, 董润, 等. 军用飞机供电系统故障预测与健康管理关键技术[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 86-95.
- Ai Fengming, Liang Xingzhuang, Dong Run, et al. Key technologies of prognostic and health management of military aircraft power supply and distribution system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 86-95. (in Chinese)
- [8] Hang J, Ding S, Ren X, et al. Integration of inter-turn fault diagnosis and torque ripple minimization control for direct-torque-controlled SPMSM drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11124-11134.
- [9] Leboeuf N, Boileau T, Nahid-Mobarakheh B, et al. Real-time detection of interturn faults in pm drives using back-EMF estimation and residual analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2402-2412.
- [10] Vaseghi B, Nahid-Mobarakheh B, Takorabet N, et al. Inductance identification and study of PM motor with winding turn short circuit fault[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 978-981.
- [11] 王延峰, 赵剑镠, 黄建波, 等. 永磁同步电机定子匝间短路故障阻抗参数分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(2): 105-109.
- Wang Yanfeng, Zhao Jian'e, Huang Jianbo, et al. Impedance parameters analysis of permanent magnet synchronous motor under inter-turn short circuit fault[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(2): 105-109. (in Chinese)
- [12] 陈慧丽, 李杰. 永磁同步电机匝间短路故障检测技术研究[J]. 微特电机, 2017, 45(9): 41-48.
- Chen Huili, Li Jie. Interturn short-circuit fault diagnosis technology for permanent magnet synchronous motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2017, 45(9): 41-48. (in Chinese)
- [13] Park J K, Hur J. Detection of inter-turn and dynamic eccentricity faults using stator current frequency pattern in IPM-Type BLDC motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1771-1780.
- [14] 付朝阳, 刘景林, 张晓旭. 双余度永磁无刷直流电机匝间短路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 104-109.
- Fu Chaoyang, Liu Jinglin, Zhang Xiaoxu. Research on inter-turn short circuit fault diagnosis of dual redundancy permanent magnet brushless DC motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 104-109. (in Chinese)
- [15] Chao W, Xiao L, Zhe C. Incipient stator insulation fault detection of permanent magnet synchronous wind generators based on Hilbert Huang transformation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 1-4.
- [16] Tian X, Guo H, Xu J. Inter-turn Short-circuit fault diagnosis of six-phase FTPMSM system based on PWM harmonic current extraction[C]. 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2022.
- [17] Hu R, Wang J, Mills A R, et al. Current-residual-based stator interturn fault detection in permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 59-69.
- [18] 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): 340-351.
- 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): 340-351. (in Chinese)
- [19] Xu J, Tian X, Jin W, et al. PWM harmonic-current-based interturn short-circuit fault diagnosis for the aerospace FTPMSM system even in the fault-tolerant operation condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 5432-5441.

[20] Holmes D G, Lipo T A . 电力电子变换器PWM技术原理与实践: Principles and practice[M]. 周克亮, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

Holmes D G, Lipo T A . Pulse width modulation for power converters: Principles and practice[M]. Zhou Keliang, Translated. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010. (in Chinese)

Inter-turn Short-circuit Fault Diagnosis Method for Triple-redundancy PMSM System

Xu Jinquan, Tian Xinlei, Guo Hong

Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract: The reliability of airborne actuator system is an important prerequisite to ensure the flight performance and flight safety of aircraft. To enhance the reliability of triple-redundancy Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM) for airborne electric actuation system, an online diagnosis method based on high-frequency harmonic current for Inter-Turn Short-Circuit Fault(ITSCF) was proposed. By the ITSCF mathematical model of the fault winding, the typical fault feature in high frequency of the d -axis and q -axis current is defined in rotating coordinate. The robustness of d -axis and q -axis harmonic current to transient disturbance is analyzed comprehensively, and the RMS value of d -axis high frequency PWM harmonic current is selected as the diagnostic feature. To eliminate the influence of the inherent harmonics of each redundant current, a fault diagnosis method based on the balance degree of the three-redundant harmonic current is proposed. Finally, a fault diagnosis method is designed, concluding that extracting the high frequency harmonic current through the band-pass filter, quantifying the harmonic current by calculating the periodic RMS, and finally realizing the fault redundancy identification through the three-redundancy balance diagnosis table. Furthermore, the validity of the diagnosis method proposed is verified by simulation, which provides reference for improving the reliability of airborne electric actuation system.

Key Words: electric actuation system; triple-redundancy PMSM; fault diagnosis; ITSCF; PWM harmonic

Received: 2023-05-31; **Revised:** 2023-06-25; **Accepted:** 2023-07-11

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (201907051002)