

文章编号: 2095-2163(2021)10-0043-08

中图分类号: TM351; TP206+.3

文献标志码: A

基于数值计算的电机耦合故障特征提取

许小伟, 李 随, 杨 炎, 韦道明

(武汉大学 汽车与交通工程学院, 武汉 430065)

摘要: 针对永磁同步电机耦合故障特征难以提取和故障机理难以分析的问题, 首先建立了同步旋转坐标系下的永磁同步电机数学模型; 并在此基础上分别推导了匝间短路故障和永磁体退磁故障以及两者耦合的故障模型; 然后运用模型解析法和信号处理的方法分别提取了单一匝间短路故障、单一永磁体退磁故障和两者耦合故障的故障特征, 仿真结果分析可知: 耦合故障时三相电流出现三次谐波分量、五次谐波分量增加和十一次谐波分量减少; 单一匝间短路故障时出现三次谐波分量、五次和十一次谐波分量减少; 而单一失磁故障时无三次谐波分量、五次谐波分量不变、十一次谐波分量减少, 因此可以通过三者的变化规律对耦合故障进行诊断。

关键词: 永磁同步电机; 故障模拟; 匝间短路故障; 退磁故障; 耦合故障

Motor coupling fault feature extraction based on numerical calculation

XU Xiaowei, LI Sui, YANG Yan, WEI Daoming

(College of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

[Abstract] Aiming at the problem that the coupling fault features of permanent magnet synchronous motor are difficult to extract and the fault mechanism is difficult to analyze, a mathematical model of permanent magnet synchronous motor in synchronous rotating coordinate system is established firstly on this basis, the fault models of interturn short circuit fault and permanent magnet demagnetization fault and their coupling are deduced respectively. Then, the fault features of the single permanent magnet demagnetization fault and the coupling fault of the single permanent magnet demagnetization fault and the coupling fault are extracted by the method of model analysis and signal processing. The simulation results show that the three-phase current has the third harmonic component, the fifth harmonic component increases and the eleventh harmonic component decreases when the coupling fault occurs, there appears the third harmonic component, and the fifth and eleventh harmonic components are reduced when the interturn short circuit fault occurs; in the case of a permanent magnet demagnetization fault, there is no third harmonic component, the fifth harmonic component is unchanged, and the eleventh harmonic component is reduced. Therefore, the coupling fault can be diagnosed by the variation rule of the three.

[Key words] PMSM; fault simulation; interturn short circuit fault; demagnetization fault; coupling fault

0 引言

电动汽车是目前汽车发展的新方向, 但电动汽车动力系统的安全性是电动汽车目前亟待解决的一个关键问题^[1-2]。永磁同步电机(PMSM)是现阶段电动汽车的主流产品, 永磁同步电机是一个故障机理映射众多的机电耦合系统, 因此对其进行故障诊断也十分复杂^[3], 永磁同步电机最为常见的故障是匝间短路故障和永磁体退磁故障。其中, 匝间短路故障危害性极强, 会对永磁同步电机造成不可逆转的损坏^[4]; 永磁体退磁故障则可能导致整个伺服系统的瘫痪; 而两者的耦合故障会对整个电机驱动系统造成难以挽回的破坏^[5]。因此研究匝间短路和

永磁体退磁故障以及两者的耦合故障特征, 探索耦合故障机理以及演化规律, 能够为永磁同步电机故障诊断提供理论依据。

目前国内外学者对匝间短路故障和永磁体退磁故障已有较多研究, 并且取得了一定的成果。丁石川等人^[6]通过模型预测控制建立了电机的价值函数, 通过分析函数中的直流分量以及二次谐波对匝间短路故障进行诊断。杨文超^[7]用BP神经网络对电流的三次谐波分量进行判断; 汪鑫等人^[8]采用一种二阶粒子群算法, 分析电机参数变化情况。Abdelli等人^[9]基于有限元电机模型, 计算故障状态下转子的漏感、磁通密度等参数, 通过比较参数的变化来诊断故障; Meyer等人^[10]通过建立一种动态观

基金项目: 国家自然科学基金(51975426); 武汉市科技计划项目(2019010701011393)。

作者简介: 许小伟(1983-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 机电设备故障诊断; 李 随(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机电设备故障诊断; 杨 炎(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机电设备故障诊断; 韦道明(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机电设备故障诊断。

收稿日期: 2021-07-30

测器对永磁电机匝间短路故障的电流和噪声进行了研究。

以上研究主要基于匝间短路和永磁体退磁故障,很少考虑两者的耦合效应,也未对两者耦合故障进行分析;并且大多采用有限元分析法或采用人工智能诊断法,前者缺乏对故障深层次的机理分析,且计算精度受建模水平、边界条件影响较大;后者只是从故障数据出发,忽略了电机本身的故障。而数学模型的解析法,则能够深入电机故障本质,探究故障对性能的影响,因此采用数学模型解析法对耦合故障进行建模分析是十分有必要的。

本文采用基于数学模型解析和信号处理的诊断方法,搭建了永磁同步电机模型,并设置了不同程度的匝间短路—永磁体退磁耦合故障,通过信号处理的方法研究耦合故障的故障特征,为耦合故障诊断提供理论依据。

1 永磁同步电机及其故障建模

1.1 数学模型建立

永磁同步电机耦合情况复杂^[11]。为了简化分析,将三相 PMSM 视为理想电机,分析的时候有以下假设:

- (1) 忽略铁芯饱和,不计涡流和磁滞损失。
- (2) 忽略换相过程中的电枢反应。
- (3) 转子上无阻尼绕组,永磁体无阻尼作用。

永磁同步电机(PMSM)在同步旋转坐标系($d-q$)下的电压方程和磁链方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{u}_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}(L_d i_d) - \omega_e L_q i_q \\ \dot{u}_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}(L_q i_q) + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

其中, u_d 、 i_d 、 L_d 、 ψ_d 分别表示 d 轴电压、电流、电感和磁链; u_q 、 i_q 、 L_q 、 ψ_q 分别表示 q 轴电压、电流、电感和磁链; R_s 为定子电阻; ψ_f 为永磁磁链; ω_e 为电角速度。

电磁转矩可表示为:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (3)$$

其中, p 为永磁同步电机极对数。

机械运动方程为:

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - \frac{B}{p} \omega \quad (4)$$

其中, T_L 为电机轴端的负载转矩; J 为负载转动惯量,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B 为电机的摩擦系数。

1.2 匝间短路故障数学模型

匝间短路数学模型原理如图 1 所示,匝间短路是由于故障相的绝缘层失效导致的,会使得故障相的非绝缘处产生短路,等效于产生一个闭合回路,此时闭合回路会产生短路电流 i_f 。

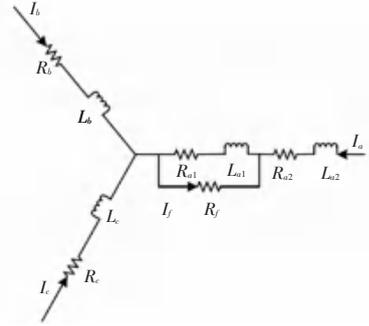


图 1 匝间短路故障原理图

Fig. 1 Schematic diagram of interturn short circuit fault

当匝间短路故障发生时,电机的三相电压方程为:

$$\mathbf{u}_{abcf} = \mathbf{R}_{abcf} \mathbf{i}_{abcf} + \frac{d}{dt} (\mathbf{L}_{abcf} \mathbf{i}_{abcf} + \boldsymbol{\psi}_{abcf}) \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_{abcf} = [u_a - u_n \quad u_b - u_n \quad u_c - u_n \quad 0]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{i}_{abcf} = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_f]^T \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{abcf} = [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c \quad \psi_f]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{R}_{abcf} = \begin{bmatrix} \hat{e} R_s & 0 & 0 & \mu R_s \\ \hat{e} 0 & R_s & 0 & 0 \\ \hat{e} 0 & 0 & R_s & 0 \\ \hat{e} \mu R_s & 0 & 0 & \mu R_s + R_f \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{L}_{abcf} = \begin{bmatrix} \hat{e} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & \mu L_{AA} \\ \hat{e} M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & \mu M_{BA} \\ \hat{e} M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & \mu M_{CA} \\ \hat{e} \mu L_{AA} & \mu M_{AB} & \mu M_{AC} & \mu^2 L_{AA} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, u_a 、 u_b 、 u_c 为三相电压; u_n 为中性点电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电流; $\boldsymbol{\psi}_{abc}$ 为三相磁链; R_s 为定子电阻; R_f 为故障相短路支路电阻; μ 为故障系数,为短路匝数/总匝数; $\mu = N_f/N$; L_{AA} 、 L_{BB} 、 L_{CC} 为三相自感; M_{AB} 、 M_{AC} 、 M_{BC} 为三相互感。由此可推得电机 a 、 b 、 c 三相磁链的数学公式为:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_a = \psi_f \cos \theta + \psi_{3h} \cos(3\theta) \\ \dot{\psi}_b = \psi_f \cos(\theta - 2\pi/3) + \psi_{3h} \cos(3\theta) \\ \dot{\psi}_c = \psi_f \cos(\theta + 2\pi/3) + \psi_{3h} \cos(3\theta) \end{cases} \quad (11)$$

其中, ψ_a 、 ψ_b 和 ψ_c 分别是电机 a 、 b 、 c 三相磁链; ψ_{3h} 为磁链三次谐波分量; θ 为磁链矢量角。

将式(6)~(10)带入公式(5)中得到:

$$\begin{aligned} \begin{cases} \dot{\psi}_a \\ \dot{\psi}_b \\ \dot{\psi}_c \\ \dot{\psi}_f \end{cases} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \mu R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ \mu R_s & 0 & 0 & \mu R_s + R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & \mu L_{AA} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & \mu M_{BA} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & \mu M_{CA} \\ \mu L_{AA} & \mu M_{AB} & \mu M_{AC} & \mu^2 L_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{i}_f \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{\psi}_a \\ \dot{\psi}_b \\ \dot{\psi}_c \\ \dot{\psi}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi}_n \\ \dot{\psi}_n \\ \dot{\psi}_n \\ \dot{\psi}_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

根据方程(12)第一行和第四行又可以得到:

$$\mu u_a - \mu u_n = [\mu(1 - \mu)R_s + R_f]i_f \quad (13)$$

可得短路电流:

$$i_f = \frac{\mu(u_a - u_n)}{\mu(1 - \mu)R_s + R_f} \quad (14)$$

中性点电压表达式为:

$$u_n = \frac{1}{3}\mu R_s i_f - \frac{1}{3}\mu L_0 \frac{d}{dt}i_f \quad (15)$$

将 park 变换用于公式(12), 可得 $d - q$ 坐标系下的匝间短路电压:

$$\begin{aligned} \begin{cases} \dot{u}_{dd} \\ \dot{u}_{qq} \end{cases} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d i_d \\ L_q i_q \end{bmatrix} - \omega_e \begin{bmatrix} L_q i_q \\ L_d i_d \end{bmatrix} - \omega_e \begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_f \end{bmatrix} \\ &\quad - \frac{2}{3}R_s \mu i_f \cos \theta_f - \frac{2}{3}\omega_e L_q \mu i_f \sin \theta_f - \frac{2}{3}L_q \mu \frac{di_f}{dt} \cos \theta_f + \frac{2}{3}\omega_e L_d \mu i_f \sin \theta_f \\ &\quad + \frac{2}{3}R_s \mu i_f \sin \theta_f - \frac{2}{3}\omega_e L_d \mu i_f \cos \theta_f + \frac{2}{3}L_q \mu \frac{di_f}{dt} \sin \theta_f + \frac{2}{3}\omega_e L_q \mu i_f \cos \theta_f \end{aligned} \quad (16)$$

其中, u_{dd} 和 u_{qq} 为匝间短路故障情况下的 d 和 q 轴的电压; θ_f 用于表示故障相 (当 $\theta_f = \theta$, $(\theta - 2\pi/3)$, $(\theta + 2\pi/3)$, 则表示匝间短路故障分别发

生在 a 相、 b 相和 c 相), 通过对比公式(1), 将公式(16) 改写为(17)、(18):

$$\begin{cases} \dot{u}_{dd} = R_s i_{dd} + \frac{d}{dt}(L_d i_{dd}) - \omega_e L_q i_{qq} \\ \dot{u}_{qq} = R_s i_{qq} + \frac{d}{dt}(L_q i_{qq}) + \omega_e L_d i_{dd} + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} i_{dd} = i_d - \frac{2}{3}\mu i_f \cos \theta_f \\ i_{qq} = i_q + \frac{2}{3}\mu i_f \sin \theta_f \end{cases} \quad (18)$$

其中, i_{dd} 和 i_{qq} 为当产生匝间短路故障的情况下产生的短路故障电流。

1.3 PMSM 永磁体退磁故障数学模型

永磁体材料通常热稳定较差, 工作温度升高或某些因素将引起明显的退磁现象。当永磁体产生退磁时, 永磁体磁链在 $d - q$ 轴将产生新的磁链分量 ψ_{rd} 和 ψ_{rq} , 这是因为电机磁场方向与永磁同步电机磁链方向产生一个偏转角 γ , 如图 2 所示。

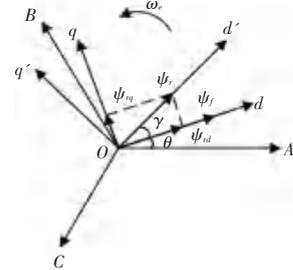


图 2 永磁体退磁时磁链的变化

Fig. 2 Changes in flux during demagnetization

在永磁同步电机退磁故障下的磁链方程与公式(2)相比多了 ψ_{rd} 和 ψ_{rq} 两项, 退磁故障下的磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{fd} = L_d i_d + \psi_{rd} \\ \psi_{fq} = L_q i_q + \psi_{rq} \end{cases} \quad (19)$$

其中, ψ_{fd} 和 ψ_{fq} 为退磁故障下的 d 、 q 轴磁链。此时的 $d - q$ 坐标系下的退磁故障电压方程为:

$$\begin{aligned} \begin{cases} \dot{u}_{fd} = R_s i_d + \frac{d}{dt}(L_d i_d) - \omega_e L_q i_q + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_e \psi_{rq} \\ \dot{u}_{fq} = R_s i_q + \frac{d}{dt}(L_q i_q) + \omega_e L_d i_d + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_e \psi_{rd} \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

其中, 因为磁链对时间的变化率与电流的变化

3.1 无故障响应分析

为了验证永磁同步电机耦合故障模型的正确性,首先需要验证正常情况下永磁同步电机的三相电流、转矩和转速这 3 个响应量。在验证过程中与 Simulink 库中自带的电机模块进行对比,验证模型的正确性。在耦合故障模型中,令匝间短路故障系数 $\mu = 0$ 和 $\psi_{rq} = \psi_{rd} = 0$, 仿真结果如图 5~图 7 所示。其结果与 Simulink 库中自带永磁同步电机模块仿真结果相同,故所建永磁同步电机模型正确。

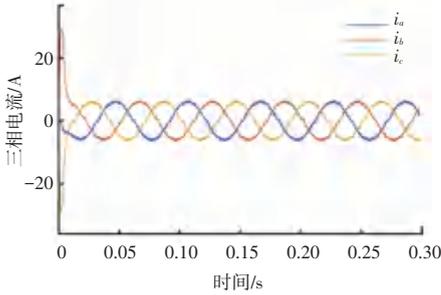


图 5 无故障电机三相电流时域图

Fig. 5 Time-domain diagram of three-phase current of fault-free motor

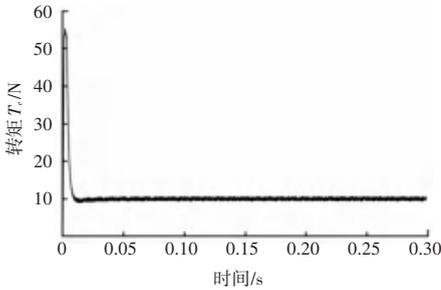


图 6 无故障电机转矩响应图

Fig. 6 Torque response diagram of fault-free motor

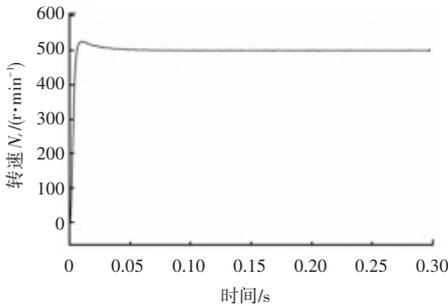


图 7 无故障电机转速响应图

Fig. 7 Speed response diagram of fault-free motor

发生匝间短路故障和退磁故障时均会对三相电流、转矩、以及转速产生影响,故只在时域内对故障进行分析是不能够对单一故障或者耦合故障做出判断的,采用 FFT 能够将上述信号由时域转变为频域对无故障时的永磁同步电机 a 相电流进行快速傅里叶分析(FFT)得到 a 相电流谐波成分,如图 8 所示。

对三相电流进行的 FFT 变换,不同的故障模式和程度对三相电流的谐波含量也不相同,故对三相电流进行频域分析,是判断单一故障和耦合故障的一个重要依据。

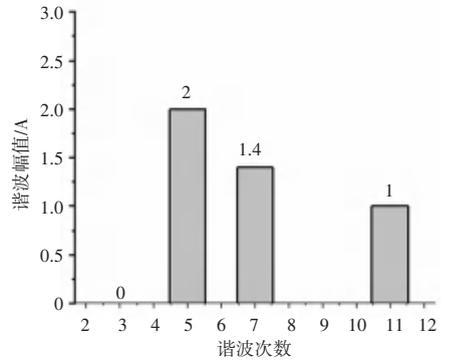


图 8 无故障 a 相电流频域图

Fig. 8 Frequency domain diagram of fault-free a phase current

3.2 匝间短路响应分析

当 a 相发生匝间短路故障时,由式(12)~式(18)可知,只要给匝间短路故障系数 μ 和故障电阻 R_f 赋值,就可以对电机匝间短路故障进行仿真。令 $\mu = 0.3, R_f = 0.5 \Omega$, 仿真结果如图 9~图 13 所示。

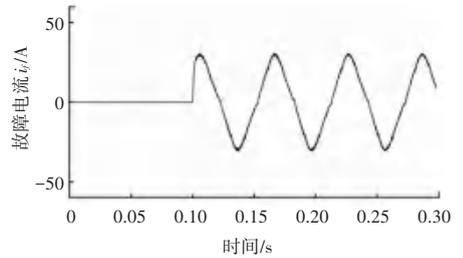


图 9 匝间短路故障电流 i_f 时域图

Fig. 9 Interturn short circuit fault current i_f time domain diagram

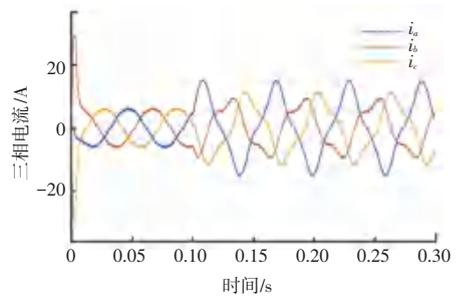


图 10 匝间短路故障三相电流时域图

Fig. 10 Interturn short circuit fault three-phase current time domain diagram

其中,短路电流是匝间短路所特有的故障特征,通过短路电流公式(14)和(15)可得,短路电流幅值 I_f 与短路故障系数 μ 和短路电阻 R_f 相关;故障系数 μ 和短路电阻 R_f 的值越大,短路电流的幅值 I_f 越大;短路电流 i_f 的频率则与永磁同步电机转速有关。由匝间短路三相电流时域图可以看出,匝间短

路故障的三相电流幅值均增大,故障 a 相电流幅值较其它两相更大;转矩和转速也产生一定的波动。

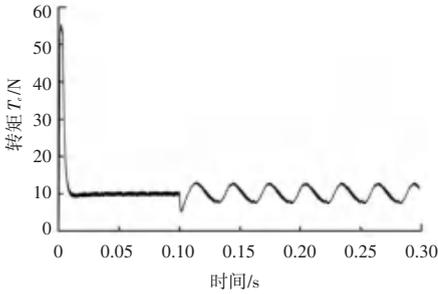


图 11 匝间短路故障转矩响应图

Fig. 11 Interturn short circuit fault torque response diagram

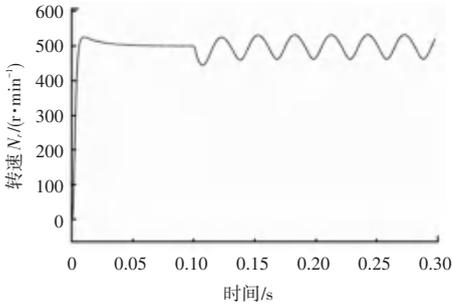


图 12 匝间短路故障转速响应图

Fig. 12 Interturn short circuit fault speed response diagram

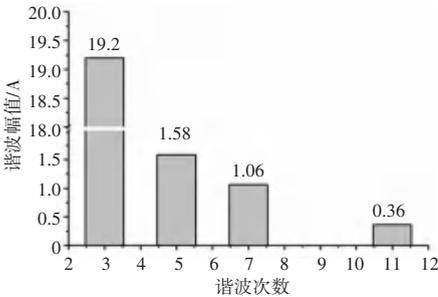


图 13 匝间短路故障相电流频域图

Fig. 13 Interturn short circuit fault phase current frequency domain diagram

由图 10~图 13 分析可知,当 a 相或某一相发生匝间短路故障时,其电磁转矩 T_e 、转速 N_r 、三相电流 i_{abc} 均发生较大波动。对三相电流中的故障相 a 相电流进行快速傅里叶变换 (FFT),可以得到 a 相电流的频域图即图 13,通过与图 8、即健康状态下的 a 相电流的频域图对比可以发现,匝间短路时的故障相电流会产生三次谐波分量,且五次谐波分量、七次谐波分量和十一次谐波分量减少;三次谐波含量与匝间短路的程度呈正相关。由此可以确定故障相电流的三次谐波含量可以作为匝间短路故障的重要判定依据。

对于匝间短路故障可以得出:

(1) 出现故障电流 i_f 其幅值与短路故障系数 μ

和短路电阻 R_f 相关。

(2) 三相电流幅值均增大,且故障相电流幅值增大最严重。

(3) 故障相电流出现三次谐波、五次谐波分量、七次谐波分量和十一次谐波分量都有不同程度的减少。

3.3 永磁体退磁响应分析

由公式 (19)~(21) 可得退磁故障发生时,在 d 轴和 q 轴上多了 ψ_{rd} 和 ψ_{rq} 两项,设置 ψ_{rd} 和 ψ_{rq} 的值来模拟退磁故障,当退磁 30% 的时,其仿真结果如图 14~图 16 所示。

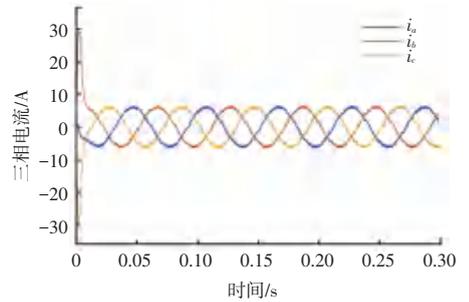


图 14 退磁故障三相电流时域图

Fig. 14 Demagnetization fault three-phase current time domain diagram

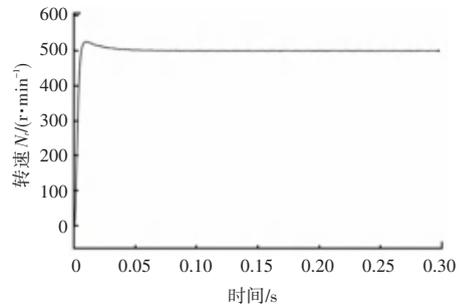


图 15 退磁故障转速响应图

Fig. 15 Demagnetization fault speed response diagram

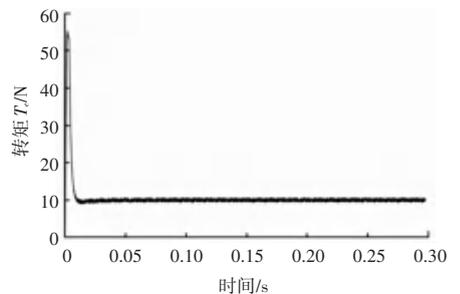


图 16 退磁故障转矩响应图

Fig. 16 Demagnetization fault torque response diagram

对比图 5 和图 14,永磁体失磁故障对三相电流 i_{abc} 波形没有变化,但是三相电流的幅值 I_{abc} 明显增大;电磁转矩 T_e 和转速 N_r 的影响在时域上很难作为故障判断依据。而三相电流进行快速傅里叶变换 (FFT) 后得到的频域图谱,则可以作为退磁故障的

故障特征;对比图 17 和图 8,可以明显地看出在发生退磁故障时,其三相电流的七次谐波和十一次谐波分量产生明显减少,五次谐波分量基本不变。

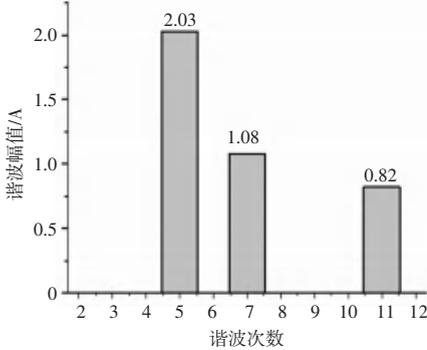


图 17 退磁故障相电流频域图

Fig. 17 Demagnetization fault phase current frequency domain diagram

对于永磁体退磁故障可以得出:

- (1)在时域上,三相电流、转矩和转速方面波形变化不大,三相电流幅值有所增加。
- (2)三相电流在频域上,无三次谐波分量;五次谐波分量基本不变;七次和十一次谐波分量均有不同程度的减少。

3.4 匝间短路-永磁体退磁耦合故障响应分析

匝间短路故障与永磁体退磁故障同时发生时候,对三相电流、输出转矩转速的响应更复杂,三相电流频率成分也更为丰富。图 18 和图 19 为匝间短路—永磁体退磁的耦合故障三相电流时域图和故障相的频域图。由图 19 耦合故障三相电流时域图可以看出,三相电流波形与单一匝间短路故障相似,只是三相电流的幅值均有所增大;从波形上很难观察出是否发生退磁故障,而在频域图上,通过与正常情况下的 α 相电流进行对比可以得出,在失磁故障和匝间短路故障同时发生时,存在三次谐波分量、五次谐波分量略微增加、七次谐波分量减少、十一次谐波分量减少明显的现象。

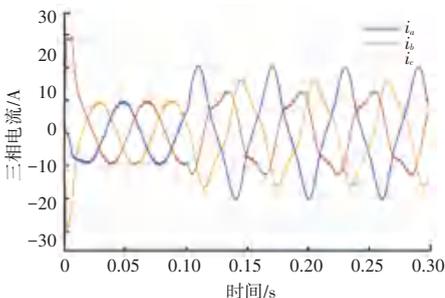


图 18 耦合故障三相电流时域图

Fig. 18 Coupling fault three-phase current time domain diagram

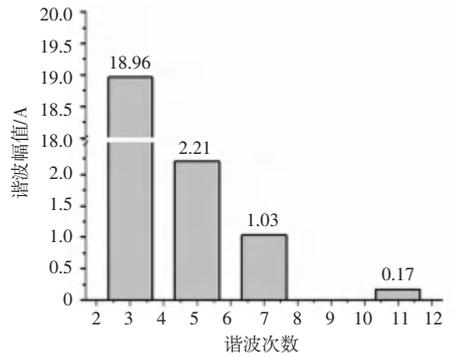


图 19 耦合故障相电流频域图

Fig. 19 Coupling fault phase current frequency domain diagram

不同故障谐波分量幅值见表 2。由表 2 可得对于耦合故障,故障相间电流在频域上出现三次谐波分量、五次谐波分量增加、七次和十一次谐波分量减少且十一次谐波分量减少明显。

表 2 不同故障谐波分量幅值

Tab. 2 Amplitude of different fault harmonic components

故障类型	谐波次数			
	3	5	7	11
正常	0	2.00	1.40	1.00
匝间短路 30%	19.20	1.58	1.06	0.36
退磁故障 30%	0	2.03	1.08	0.82
耦合故障	18.96	2.21	1.03	0.17

4 结束语

本文在建立永磁同步电机的数学模型的基础上,分别对电机的匝间短路故障和永磁体退磁故障进行分析,建立了匝间短路—永磁体退磁耦合故障模型,并通过 $i_d = 0$ 矢量控制得到转矩、转速和三相电流等响应特征。通过对比正常状态、单一匝间短路故障、单一永磁体退磁故障和两者的耦合故障得到如下结论:

- (1)搭建的永磁同步电机耦合故障数学模型与 Simulink 自带永磁同步电机模块在无故障状态下,其输出三相电流、转矩、转速均相同,验证了自建模型的有效性。
- (2)匝间短路故障其故障电流 i_f 、三相电流幅值、故障相电流三次谐波分量都可作为故障特征。
- (3)永磁体退磁故障的三相电流七次和十一次谐波分量可作为故障特征。
- (4)耦合故障电流的三次谐波分量、五次谐波分量和十一次谐波分量可作为耦合故障的故障特征,通过三者的变化规律作为故障类型的判断依据。