

永磁同步电机匝间短路故障匝数诊断方法^{*}

付彦伟¹, 余建生¹, 易建波²

(1. 国能大渡河枕头坝发电有限公司, 四川 乐山 614700;

2. 电子科技大学 机械与电气工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)发生匝间短路故障时故障匝数难以诊断的问题,提出了在离线状态下对电机发生故障的匝数进行精确诊断的方法。首先分析了绕组发生匝间短路故障前后的电机模型,通过在离线的故障电机电路中接入激励源的方式,提取出了故障相电流的幅值和相位,结合激励源参数、电路参数,建立了故障匝数指示器。仿真结果表明,该方法可以准确地计算出从无故障状态到全绕组故障状态范围内发生短路的绕组匝数。该方法可以直接在电机上实施,不需要在目标电机上加装复杂的设备或添加额外传感器,在永磁同步电机的检修等方面具有良好的使用价值。

关键词: 永磁同步电机; 匝间短路; 短路匝数测定; 故障诊断

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)09-0042-07

doi: 10.12177/emca.2023.099

Diagnosis Method of Turns of Permanent Magnet Synchronous Motor for Inter-Turn Short-Circuit Fault^{*}

FU Yanwei¹, YU Jiansheng¹, YI Jianbo²

(1. Guodian Dadu River Zhentouba Hydropower Development Co., Ltd., Leshan 614700, China

2. School of Mechanical and Electrical, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: For the problem that the number of faulty turns is difficult to diagnose when an inter-turn short-circuit fault occurs in a permanent magnet synchronous motor (PMSM), an accurate diagnosis method for the number of faulty turns of a faulty motor offline in an offline state was proposed. Firstly, the conditions that the motor model under the inter-turn short-circuit fault of the winding and under the normal state were analyzed, the excitation source was connected to the simulation circuit, the amplitude and phase of the faulted phase current were extracted, and the fault diagnosis indicator was established by combining the excitation source value, circuit parameters and current. The simulation results illustrate that the method could accurately calculate the number of winding turns in the range from the fault-free state to the full-winding fault state. The method can be directly implemented, without installing complex equipment and additional sensors on the target motor, and has utility value in the maintenance of permanent magnet synchronous motors.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); inter-turn short circuit; measurement of short-circuit turns; fault diagnosis

收稿日期: 2023-03-01; 收到修改稿日期: 2023-04-23

^{*} 基金项目: 四川省科技厅重点研发计划项目(2022YFG0120)

作者简介: 付彦伟(1991—),男,本科,工程师,研究方向为电机故障智能诊断方法。

余建生(1987—),男,本科,工程师,研究方向为电机故障智能诊断方法。

易建波(1981—),男,博士,副教授,研究方向为数据处理及故障诊断方法。(通信作者)

0 引言

永磁同步电机由于其效率高、转矩密度大及功率大等特点被广泛使用。为防止发生系统性乃至灾难性的故障,及时诊断出电机故障十分重要。除此之外,及时发现故障可对故障后的应对措施给予指导,避免发生重大损失事故。永磁同步电机的故障主要包括轴承故障、偏心故障、退磁故障和定子故障等,其中匝间短路故障是常见且难以检测的故障^[1]。在电机运行中,热应力、机械应力、过电流、环境污染以及设备老化等原因均会引起绝缘失效,进而发展为匝间短路故障。根据统计信息,30%的电机故障是由定子绕组故障导致的,同相绕组间发生的短路故障即为匝间短路故障,而80%的电机短路由匝间绝缘故障发展而来^[2]。匝间短路故障初期通常发生在少数匝数中,由于短路阻抗很小,因此会产生较大的故障电流,导致局部过热,进而使绕组之间绝缘进一步被破坏,扩大故障范围,直至绝缘完全失效,同时还会导致磁体发生不可逆的退磁现象。

永磁同步电机匝间短路故障诊断的方法主要有两种,一种是通过特征信号^[3]进行故障诊断,包括电流、电压和磁通分析等方式。另一种则是基于模型进行诊断,包括参数的变化以及反电动势估计器^[4]等方式。Yuan等^[1]用低正弦电压激励静止状态下的永磁同步电机,结合响应电流和电机参数计算出短路匝数。文献[5]直接提取出同相电流和异相电流,分析电流的波动特征,通过对比三相电流波峰值的不平衡度实现对匝间短路的诊断,但是该方法并不能得到短路的匝数,其缺乏对故障严重程度的评估。Huang等^[6]在考虑到电流控制器对电机模型的影响后,提出了一种新的函数,即通过对不同带宽的电流和电压比进行加权,综合电流和电压的二次谐波实现故障检测。在基于小波变换方法的基础上,文献[7]以特征频段系数的均方根作为故障指示进行诊断,获得了较好的诊断效果,虽然该方法能够有效发现单匝故障,但是并未证明对不同程度的匝间短路故障能否保持精确性。文献[8]利用电压信号的负序分量排除了转子转速对结果的影响,故障程度较低时能获得优于零序分量的诊断效果,但是该方法设定最轻微故障为4%,没有实现对更早期

故障的诊断。Wang等^[9]指出在匝间短路故障后, dq 轴上的电流、电压和功率均会产生明显的二次谐波,因此分别使用有功功率和无功功率的二次谐波对处于发电和负荷状态下的电机进行诊断。但是Park变换使用的前提是电机对称,而匝间短路故障建模时,电路非对称。文献[10]为了适应匝间短路故障导致的不对称现象应用相坐标法,在 abc 坐标系建立模型,将故障后相电流的三次谐波作为故障特征。Wei等^[11]则是通过短时Adaline从时变电流信号中提取二次谐波进行检测。除了单独使用基波、2次和3次谐波外,文献[12]融合了定子电流的基波和3次谐波,推导出匝间短路后定子电流会出现5次谐波,并且可以作为故障的有效表征。Wang等^[13]使用从发电机收集的定子支路电压和定子不平衡支路电流作为串联模型的输入和输出信号,采用递归批量最小二乘法计算Volterra级数的三个核,通过观测Volterra内核的改变完成诊断。Mazzoletti等^[14]为了避免可能受到的外部干扰带来的影响和减少误差诊断,提出了通过测量绕组中点电压进行诊断的方法。文献[15]提出了利用改进小波包和快速傅里叶变换处理定子电流信号和振动信号对低速电机进行故障诊断的方法。基于信号的诊断方法中,联合信号处理的诊断方式能获得较高的准确率。对电流信号和振动信号同时进行小波变换,可以获取时频域中增加的谐波分量作为故障特征。除此之外,文献[16]中结合了频域电流、磁通密度和电磁转矩等多个信号,利用变分自编码器提取特征并扩充数据的方法,继而训练稀疏自编码器完成故障诊断,但是增加了参数测量成本。除了电信号,还有利用温度和磁场等信号进行故障分析的方法^[17-18],文献[17]基于磁通分析的方法利用杂散磁通的三次谐波补偿磁通基波方法的适用范围有局限性。文献[18]采用有限元分析方法,将环境风速和电机散热性能纳入考虑,研究永磁同步电机匝间短路前后的温升,对试验与仿真间的误差作出了合理解释,但该方法只测试了一种故障匝数情况下的方案准确性。

本文提出的方法不需要添加复杂的测量器件,使用容易获取的电参数,精确计算短路匝数,直接展示出故障的严重程度,为后续计及更多影响因素的故障模型建立打下基础。在对离线后永

磁同步电机匝间短路故障模型进行分析后,完成特征辨识,确定能够准确计算出故障匝数的特征量,推导出短路匝数计算公式,结合特征量和电机参数完成匝数确定,可用于各种故障程度下的短路匝数计算。

1 电机模型

1.1 故障模型

本文以永磁同步电机为对象,其离线状态下的电路模型为对称的三相星型电路,其电路图如图1所示,由三组电阻电感串联电路组成。



图1 永磁同步电机等效模型图

每一相的阻抗可表示为

$$Z_s = R_s + j2\pi f L_s \quad (1)$$

式中: R_s 、 L_s 为永磁同步电机正常状态下的电阻、电感; f 为电路工作频率。

当永磁同步电机发生匝间短路之后,以 A 相发生故障为例,电路模型中的故障相将会发生对应的改变,其模型图如图2所示。

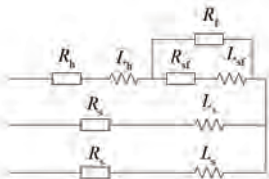


图2 永磁同步电机无源匝间短路故障模型图

在故障模型中,正常相(B、C)电路结构并未改变,故障相(A)电路改变为故障部分阻抗与剩余正常部分阻抗串联,构成了非对称的三相星型电路。图2中的各相阻抗表示为

$$\begin{cases} Z_a = R_h + j2\pi f L_h + R_f // (R_{sf} + j2\pi f L_{sf}) \\ Z_{b,c} = R_s + j2\pi f L_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_h 、 L_h 分别为故障相中未发生故障的电路部分电阻值、电感值; R_{sf} 、 L_{sf} 分别为故障部分电路的正常情况下的参数; R_f 为故障后形成的短路支路电阻。

1.2 短路匝数求解计算式推导

得到故障模型后,为推导离线状态下的短路

匝数求解计算式,需构建电压电流的平衡方程,因此接入单相电压源作为电路的激励,其模型图如图3所示。

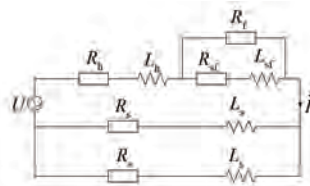


图3 永磁同步电机有源匝间短路故障模型图

将未发生故障的两相并联,然后与故障相串联,再将单相电压源接入之后即得到有源的匝间短路故障模型。在实际运用中,可以采用将三相电路两两并联后再与电源串联,对干路电流进行测量,获取三组电流值,其中不同的一组即为图3所示的电路接线,因此在构建电路过程中可以完成对故障相的定位。

获得了完整的诊断电路之后,将电压源的相位、幅值、频率分别设置为 θ_v 、 U 、 f ,将由电流互感器测量得到的干路电流的幅值、相位分别命名为 θ_i 、 I ,利用设置及测量得到的参数,结合电机绕组的参数,能够得到图3所示电路中的平衡方程为

$$\begin{cases} \dot{U} = \left[\frac{1}{2} (R_s + j\omega L_s) + R_h + j\omega L_h + A \right] \cdot \dot{I} \\ A = \frac{R_f \cdot (R_{sf} + j\omega L_{sf})}{R_f + R_{sf} + j\omega L_{sf}} \end{cases} \quad (3)$$

假设永磁同步电机发生故障相的故障匝数 n 与故障相绕组总匝数 N 的比例为 k ,即 $k = n/N$ 。获得参数 k 之后,可以列写出图3及式(3)中各个参数之间的转换关系式:

$$\begin{cases} R_h = (1 - k) \cdot R_s \\ L_h = (1 - k)^2 \cdot L_s \\ R_{sf} = k \cdot R_s \\ L_{sf} = k^2 \cdot L_s \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中可以得到新的电压、电流平衡方程为

$$\begin{cases} \dot{U} = \left[\frac{1}{2} Z_s + (1 - k) R_s + j\omega (1 - k) 2L_s + B \right] \cdot \dot{I} \\ B = \frac{R_f \cdot (k R_{sf} + j\omega k^2 L_s)}{R_f + k R_s + j\omega k^2 L_s} \\ Z_s = R_s + j\omega L_s \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)进行变换,得到干路电流的相位与模值为

$$\begin{cases} I = \frac{U}{\sqrt{C^2 + \omega^2 D^2}} \\ \theta_I = \theta_U - \arctan\left(\frac{\omega D}{C}\right) \\ C = \left(\frac{3}{2} - k\right) R_s + k R_f^2 R_{sf} + k^2 R_s R_f R_{sf} + \omega^2 k^4 L_s^2 R_f \\ D = k^2 R_f^2 L_s + k^3 R_f R_s L_s - k^3 R_f R_{sf} L_s + \\ \left(\frac{3}{2} + k^2 - 2k\right) L_s \end{cases} \quad (6)$$

考虑到实际情况下,短路支路的电阻 R_f 数值极小,因此在本文中将其数值大小视为零。变换式(6)可以得到干路故障电流的幅值、相位的理论值为

$$I = U / \left[\left(\left(\frac{3}{2} - k \right)^2 R_s^2 + \omega^2 \left(\frac{3}{2} + k^2 - 2k \right)^2 L_s^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

$$\theta_I = \theta_U - \arctan \left[\frac{\omega L_s \left(\frac{3}{2} + k^2 - 2k \right)}{\left(\frac{3}{2} - k \right) R_s} \right] \quad (8)$$

式(7)、式(8)即为永磁同步电机匝间短路故障模型的电压、电流平衡方程,其中的未知参数只有匝数短路比 k ,因此对式(8)进行求解即可得到:

$$\begin{cases} k = \frac{E \pm \sqrt{E^2 - 6(1-E)}}{2} \\ E = 2 - \frac{R_s \tan(\theta_U - \theta_I)}{\omega L_s} \end{cases} \quad (9)$$

在式(9)中,计算得到的短路匝数比 k 为一元二次方程的一组重根,但是实际上 k 应该是一个固定的准确值,因此需要设定计算值的筛选方案。分析式(7)可以得出结论,当 $k \in [0, 1]$ 时,干路电流模值 I 是单调递增的,因此将式(9)得到的一组根代入式(7),得到对应的一组干路电流模值,再与实际测量得到的干路电流模值进行比较验证,确定唯一的短路匝数比,进而求解 $N = k * n$ 得到实际的永磁同步电机发生匝间短路的精确匝数。完整的诊断方法流程如图4所示。

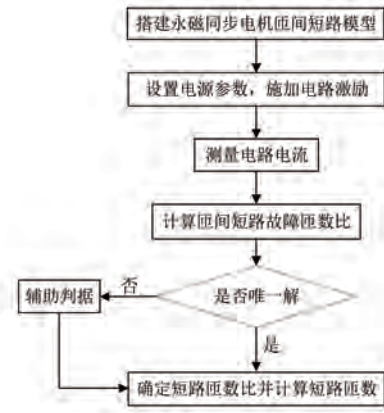


图4 诊断方案流程图

2 故障诊断

本文以永磁同步电机为例,通过 MATLAB/Sumilink 软件进行电气仿真,设置电机绕组的电阻值为 1.5Ω ,电感值为 0.112 H 。建立的电路图如图3所示,在第一次测试中,设置绕组实际发生短路的匝数比为 0.01 ,将单相交流电压源的频率设置为 50 Hz ,通过函数随机产生 500 组电压相位和电压幅值,通过本文提出的诊断方法,得到诊断结果如图5所示。

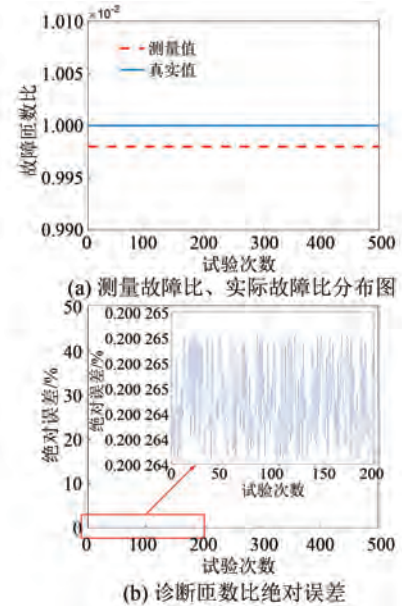


图5 变电压诊断结果

根据图5(a)可知,该方法在匝间短路故障匝数诊断应用上具有良好的可行性与准确性,在电压源相位发生变化的情况下,测量值对变化的响

应几乎不可见,匝数比测量曲线数值恒定且与实际值误差控制在 10^{-5} 的量程内。由图 5(b) 知,绝对误差数值波动的位置处于十万分位,误差曲线在数值上不断波动,但是其数值在一定的区间范围内。根据式(9)可知,匝数诊断依靠于电压源与干路电流之间的相位差 θ 。电压源幅值的变化,使得电流幅值作出等比例响应,但对电压和电流之间的相位差 θ 没有影响。电压源相位的改变会引起电流相位的同步变化,但是因为电路结构和电源频率没有发生变化,相位差 θ 不会发生变化。因此电流电压源相位和幅值对诊断结果的精度没有产生影响,试验符合预期。

为了更全面地验证诊断方案的可行性和准确性,将试验条件更改为单相电压源频率固定为 50 Hz,随机产生 500 对电压相位和电压幅值,随机生成故障匝数比,得到的诊断结果如图 6 所示。

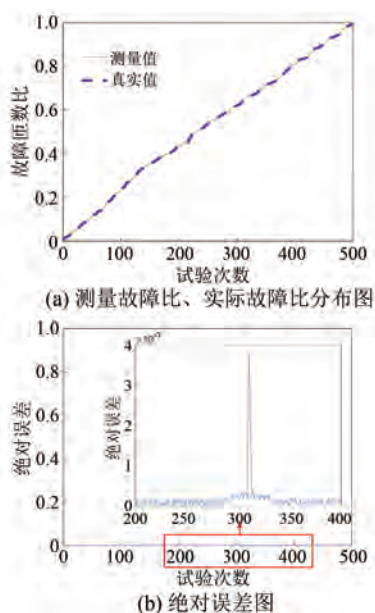


图6 变故障匝数比诊断结果

从无匝间短路故障开始,逐渐增加短路匝数比,直至绕组全部发生短路时结束。图 6(a) 展示了实际的故障匝数比与测量匝数比之间的异同,两者的变化趋势和数值大小上近似,证明了该试验条件下诊断方案的可靠性。通过计算得到的实际值和测量值之间的绝对误差如图 6(b) 所示,据图 6(b) 可得,两者的绝对误差量级为 10^{-3} 。在绝对误差曲线中,在第 300 次测试附近出现了误差峰值,对于该峰值的出现解释如下,根据式(9)可

知,在全部解集中存在一组相等的根,实际操作中该组根十分接近,因此对式(8)的筛选过程产生影响,导致误差的增加,但即使是最大误差也只是 10^{-3} 的数量级,在宏观曲线上看,绝对误差依然近似于 0。根据上述分析,本文提出的方法能够在额定频率状态下,对任意匝数发生故障的情况都可作出有效诊断,即能够实现在故障发生初期对电机的故障程度进行准确地诊断,有效防止故障扩大,避免产生更大的危害。

在上述的仿真分析中,探讨了电压源相位、幅值和故障匝数比对诊断结果的影响,式(9)中电压源频率对诊断结果的影响未做评估,因此将试验条件更改为随机生成 500 组电压相位、电压幅值、电压频率、故障匝数比,在该次试验中将频率上限设置为 50 Hz,得到的诊断结果如图 7 所示。

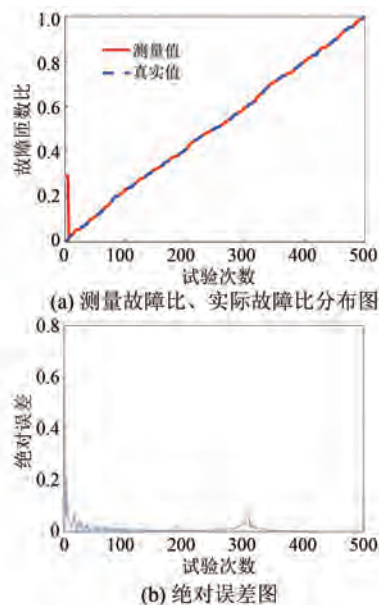


图7 变频条件1的诊断结果

由图 7 可知,随着电压源频率的增加,测量值和实际值表现出相似的变化趋势,并且有相近的幅值,绝对误差基本处于零。误差曲线中,第 300 次试验附近出现的小尖峰原理与图 6 中相同。在图 7 中,频率为零时,误差曲线出现了异常峰值,该现象出现的原因是据式(9),0 Hz 的电压源导致方程中出现了分母为零的项,在计算过程中产生了无限大的数值,导致误差出现在电路层面上,当电源频率为零后,绕组电感特性被忽略,改变了电路结构。而在实际运用中,交流电压源的频率

不会为零,因此该误差对本文提出的诊断方法的准确性不会产生影响。

为了进一步验证在更大范围区间内的电源频率变化对诊断结果的影响,将上诉试验条件中频率上限的 50 Hz 更改为 500 Hz,再次试验后得到的诊断结果如图 8 所示。

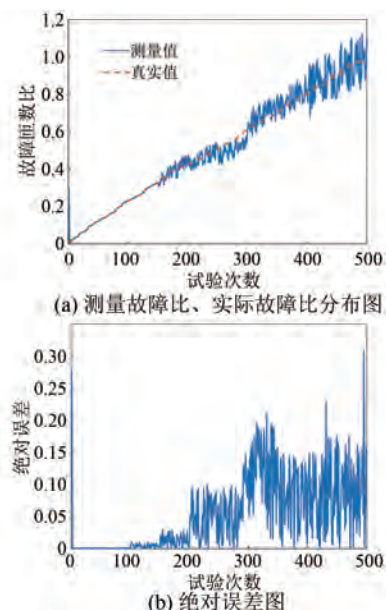


图 8 变频条件 2 的诊断结果

在图 8 中,当电压源频率不超过 200 Hz 时,测量值曲线和实际值曲线在除零点外的区域几乎一致,在电压源频率超过 200 Hz 后,测量值呈现不规则的锯齿波形,同时曲线出现随机分布的趋势,诊断的准确性下降。在绝对误差曲线中表现为,频率大于 200 Hz 后误差幅值大幅度变化,峰值急剧上升。原因是据式(9)中,当频率增加之后,电路的电阻、电感以及压流相位差对诊断结果的影响将会被极大的角速度弱化,导致匝数比由角速度起决定性作用,使匝数 k 的求解结果逐渐退化为一对共轭的虚数根,对应电路即为电路向感性偏移,电阻的影响减小,电路结构不再如同图 3 所示,因此电压频率过大导致的准确率下降是合理的。但是在实际运用中,单相交流电压源的频率可以在一定的范围内进行调整,而图 8 可以论证即使是 100 Hz 的电压源,本文的诊断方法仍能保持较高的准确率,因此在实际运用中不会出现由于电压频率导致的诊断缺陷情况。

3 结 语

本文提出了利用电机模型的电气特征量对离线状态下的永磁同步电机匝间短路故障下短路匝数的诊断方法,可以确定故障相位置,对低匝数故障的诊断有较高的准确性。通过仿真分析可知,该方法可以在宽泛的电源频率、任意电压相位、幅值的条件下,对各种程度的匝间短路故障进行故障匝数的准确计算。仿真结果表明,电压源相位、幅值的变化不会对诊断结果的准确率产生影响,当电压源频率大于零且不超过 200 Hz 时,诊断的准确率能够保持在较高水平,不超过 100 Hz 时能够得到最佳的诊断效果,当频率大于 200 Hz 后,由于同步电机的电路特性,诊断结果将不再具备稳定性和准确性,因此在应用中需要对电压源的频率进行限制。在电压源频率适当的情况下,该模型对发生各种程度匝间短路故障的匝数都可以进行准确地计算。

本文提出的利用电机模型的电气特征量对离线状态下的永磁同步电机匝间短路故障的短路匝数的诊断方法不需要添加复杂的测量器件,使用容易获取的电气参数,能准确计算出短路匝数,从而直接展示出故障的严重程度。

【参考文献】

- [1] YUAN Q, BOSTANCI E, ZAFARANI M, et al. Severity estimation of interturn short circuit fault for PMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2019, 66(9): 7260.
- [2] LAI C, AISWARYA B, VICKI B, et al. Analysis of stator winding inter-turn short-circuit fault in interior and surface mounted permanent magnet traction machines [C] // IEEE Transport Electrification Conference and Expo, 2014: 1.
- [3] 吴国沛, 余银犬, 涂文兵. 永磁同步电机故障诊断研究综述[J]. 工程设计学报, 2021, 28(5): 548.
- [4] ZAFARANI M, BOSTANCI E, YUAN Q, et al. Interturn short-circuit faults in permanent magnet synchronous machines: An extended review and comprehensive analysis [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 2018, 6(4): 2173.
- [5] 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.
- [6] HUANG S, AGGARWAL A, STRANGAS E G, et al. Robust stator winding fault detection in PMSMs with respect to current controller bandwidth [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(5): 5032.
- [7] 王芳. 基于小波分析永磁同步电机匝间短路故障检测[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 123.
- [8] 吴娟娟, 皮薇薇. 永磁同步电机轻微匝间短路故障的检测方法[J]. 电气传动, 2020, 50(4): 98.
- [9] WANG B, WANG J, GRIFFO A, et al. Stator turn fault detection by second harmonic in instantaneous power for a triple-redundant fault-tolerant PM drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2018, 65(9): 7279.
- [10] 杨胜明, 吴钦木. 永磁同步电机匝间短路故障建模及仿真分析[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(2): 184.
- [11] WEI D, LIU K, HU W, et al. Short-time adaline based fault feature extraction for inter-turn short circuit diagnosis of PMSM via residual insulation monitoring [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(3): 3103.
- [12] 彭伟, 赵峰, 王永兴, 等. 永磁同步电机匝间短路故障在线检测方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(3): 41.
- [13] WANG L, LI Y, LI J. Diagnosis of inter-turn short circuit of synchronous generator rotor winding based on volterra kernel identification [J]. Energies, 2018, 11(10): 2524.
- [14] MAZZOLETTI M A, BOSSIO G R, ANGELO C. Interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM with partitioned stator windings [J]. IET Electric Power Applications, 2020: 2301.
- [15] 张周磊, 李垣江, 李梦含, 等. 基于深度学习的永磁同步电机故障诊断方法[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(10): 123-129.
- [16] GURUSAMY V, BOSTANCI E, CHEN L, et al. A stray magnetic flux-based robust diagnosis method for detection and location of interturn short circuit fault in PMSM [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1.
- [17] 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): 22.
- [18] 谢颖, 胡圣明, 陈鹏, 等. 永磁同步电机匝间短路故障温度场分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 322.

(上接第 41 页)

- [17] LUO C, YAO J, GU J. Extended-state-observer-based output feedback adaptive control of hydraulic system with continuous friction compensation [J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(15): 8414.
- [18] 李耀华, 王孝宇, 周逸凡, 等. 双 BP 神经网络的永磁同步电机磁链与转矩无差拍控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(4): 16.
- [19] WU J, CHEN X W, ZHAO Q J, et al. Adaptive neural dynamic surface control with prespecified tracking accuracy of uncertain stochastic nonstrict-feedback systems. [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, S2: 3408.
- [20] ZHANG T, XU H. Adaptive optimal dynamic surface control of strict-feedback nonlinear systems with output constraints [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(5): 1.