

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.06.045

永磁同步电机故障诊断研究综述*

左启轩¹,汪波²,陈静波²,夏懿³,董海鹰¹

(1.兰州交通大学 新能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730070; 2.兰州万里航空机电有限责任公司,甘肃 兰州 730070;
3.临夏供电公司,甘肃 临夏 731100)

摘要:永磁同步电机因其体积小、功率密度高等优点,被广泛应用于电动汽车、航空航天、工业制造等领域。受工作环境的影响,永磁同步电机在运行过程中不可避免地会出现各种故障。因此为满足上述领域对电机运行安全可靠性的严格要求,需对永磁同步电机及驱动系统进行故障诊断。文章根据国内外研究现状,对永磁同步电机故障诊断方法进行了综述,并根据研究现状以及现实需求,对永磁同步电机故障诊断未来的研究热点及发展趋势进行了总结和展望。

关键词:永磁同步电机;永磁体故障;电气故障;机械故障;故障诊断

中图分类号:TM351

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)06-0161-07

Review on Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motor

ZUO Qi-xuan¹, WANG Bo², CHEN Jing-bo², XIA Yi³, DONG Hai-ying¹

(1.College of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2.Lanzhou Wanli Airlines Electromechanical Limited Liability Company, Lanzhou 730070, Gansu, China;
3.State Grid Linxia Power Supply Company, Linxia 731100, Gansu, China)

Abstract: The permanent magnet synchronous motor is widely used in electric vehicles, aerospace, industrial manufacturing and other fields because of its compact size and high-power density. However, affected by the working environment, the permanent magnet synchronous motor will inevitably have various faults in the process of operation. In order to meet the strict requirements for the safety and reliability of motor operation in the above fields, fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor and drive system is required. Based on the research status at home and abroad, this paper summarizes the fault diagnosis methods of permanent magnet synchronous motor. According to the research status and practical needs, the future research hotspots and development trends of permanent magnet synchronous motor fault diagnosis are described.

Key words: PMSM; permanent magnet failure; electrical fault; mechanical failure; fault diagnosis

0 引言

随着现代工业与科学技术的飞速发展,永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因体积小、结构简单、功率密度高等优点被广泛应用于电动汽车、航空航天、工业制造等各个领域^[1]。然而,由于永磁同步电机长时间超负荷的运行以及周围环境因素的影响,使得其故障率逐渐增长。因此,及时发现并准确地诊断永磁同步电机故障对保证设备系统安全稳定的运行具有重要的价值意义^[2]。

笔者根据国内外研究现状,并结合永磁同步电机自身结构特点,从永磁体故障、机械故障、电气故障这三个方面对永磁同步电机故障诊断方法进行归纳和总结^[3]。

1 永磁体故障诊断方法

当永磁同步电机在复杂工况下运行时,受高温、剧烈振动和外界磁场的影响,可能会造成电机永磁体不可逆的退磁故障,从而导致电机无法正常运行^[4]。

常用于永磁体退磁故障诊断的特征信号包括径向磁场密度、反电动势、电磁转矩和定子电流等。目前对于永磁同步电机永磁体退磁故障的诊断方法主要有:①基于信号变换的退磁故障诊断方法;②基于等效磁路的退磁故障诊断方法;③基于参数感知的退磁故障诊断方法^[5]。

众多学者展开了对比研究。Barmpatza A C、Gherabi Z等^[6-7]利用快速傅里叶变换对永磁同步电机的反电动势和定子电流进行了预处理,并对反电动势的谐波幅值和电流频谱实部和虚部分量进行了监测,以此来确定电机是否发生退磁故障。Song X等^[8]提出了一种基于S变换和粒子群优化最小二乘-支持向量机的故障识别系统,该方法抗噪声能力强、计算量小,而且退磁故障识别率高达100%。Espinosa A G等^[9]对电机正常状态与故障状态下的转矩变化进行了分析,提出了一种应用希尔伯特-黄变换的方法,

* 收稿日期:2023-01-04

基金项目:甘肃省科技重大专项项目:高压大功率伺服电机及驱动系统研发与产业化(编号:21ZD4GA005)。

作者简介:左启轩(1999-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向:永磁同步电机智能控制。

并将其用于永磁同步电机动态和稳态情况下的退磁故障诊断。Ruiz等^[10]利用连续小波变换和离散小波变换对永磁同步电机定子电流进行了处理,再通过监测定子电流的谐波来判断电机是否发生退磁故障。连续小波变换能够快速诊断电机退磁故障,而离散小波变换方法能通过降低数据维数来加快运算速度。丁石川等^[11]提出一种 d 轴等效磁路的建模方法,对获得的特征信号进行归一化处理,在相同定子电流幅值下,通过比较电机健康状态和故障状态时的径向气隙磁密幅值来判断电机永磁体是否出现退磁故障。Farooq J等^[12]利用等值磁导网络来模拟永磁同步电机,在此基础上提出一种半解析等值模型,并依据磁导网络来计算或测量电动势和电磁转矩,通过与正常运行状态下的电机进行对比来判断电机永磁体是否发生退磁故障。刘颖明等^[13]提出利用滑膜观测器来实现对退磁故障在线诊断的方法,通过对电机的永磁体磁链进行实时监测来实现永磁体的故障诊断。该方法具有参数辨识精度高、故障诊断速度快的优势。高彩霞等^[14]首先建立了永磁同步电机的二维有限元模型;通过二维有限元法将获得的不同退磁程度下的电机参数和健康状态下的参数进行了对比分析;最后采用反电动势回转半径法实现对永磁体退磁故障和退磁程度的准确诊断。杨冀堃等^[15]利用扩展卡尔曼滤波对电机故障时的磁链进行了在线感知和动态校正,解决了永磁同步电机永磁体失磁故障发生时磁链信号不稳定所导致的故障难以诊断的问题。该方法具有较快的诊断速度以及实际的工程应用价值。何静等^[16]将滑膜观测器和龙伯格观测器结合起来,通过实时感知永磁体的磁链,进而实现永磁同步电机的退磁故障诊断。

上述故障诊断方法均实现了对永磁体退磁故障的智能识别,但在具体的故障类型和损坏程度等方面研究较少。因此在永磁同步电机退磁故障诊断研究中,如何从原始故障信号中准确提取出有效的故障特征,并采用精准的诊断策略实现量化识别在这一研究领域是一个难题^[17]。

2 机械故障诊断方法

永磁同步电机的机械故障一般可以分为转子偏心故障和轴承故障^[18]。转子偏心故障是由于电机定子和转子之间的气隙出现不对称导致的,这种气隙上的不对称会因为轴承损坏、其它转子故障、负载连接不对中、热应力或机械应力而导致轴弯曲,此外,电机支架没有固定在坚实的平面等因素也会加剧轴弯曲。轴承故障的最主要原因是润滑失效、固体杂质进入,其次是装配不当、过载、机械磨损、变形等原因导致的。下面将对转子偏心故障和电机轴承故障展开研究。

2.1 转子偏心故障诊断方法

转子偏心故障可导致永磁同步电机的气隙磁场发生变化,并破坏电机转子的稳定性。而且电机转子出现所有的不对称故障都会产生相同的转子转动频率分量,这会对电机电流特征分析产生一定的影响,进而致使电机性能下降,并出现噪声、振动以及转矩脉动等问题^[19]。

因此, Park Y等^[20-21]通过模拟霍尔传感器信号来弥补电机电流特征分析对转子故障诊断的局限性。此外,杨存祥等^[22]对电机正常和故障条件下的定子电流进行了小波包分析,得到了电机定子电流信号的小波包分解系数,并将其定子电流三次谐波分量作为诊断永磁同步电机转子偏心的特征信号。李全峰等^[23]利用电机振动速度频谱分析实现了对转子偏心的快速诊断。通过比较转子静态偏心和动态偏心时径向电磁力波与正常状态时的差异,将转子静、动态偏心时新增的径向电磁力波阶次与频率作为判断转子静、动态偏心的理论依据。Zeng C等^[24]提出一种提取转子故障特征并制定相应故障诊断的方法。该诊断方法可以有效地识别出相应的故障类型,并可对电机转子偏心率的大小和方向进行诊断。所提方法可为电机的运行维护提供重要依据,有助于降低故障损失,从而提高电机及整个系统的可靠性。

基于特征信号的故障诊断方法不依赖于某个特定的故障类型,其具有诊断范围广的优势。以上基于特征信号的转子偏心故障诊断方法的研究重点在于电机非稳态运行时特征信号的提取以及数据的处理等方面。

2.2 电机轴承故障诊断方法

轴承故障是电机系统中发生概率最高的故障,其至少占电机系统所有故障发生总频率的40%^[25]。轴承故障特征频率特殊,一般不和其它故障的特征频率重叠,因此电机轴承的故障特征信号比较容易被感知到。基于振动信号的分析方法是目前永磁同步电机轴承故障最常用的诊断的方法,除此之外还有基于故障电流信号的诊断方法。

杨春洁等^[26]使用编译软件对提取的电机轴承振动信号进行了小波去噪处理,并结合希尔伯特包络分析提取了去噪后信号的特征故障频率,并将其用于电机轴承故障诊断。考虑到电机轴承故障信号通常存在非线性和不稳定性问题,王春雷等^[27]使用短时傅里叶变换将振动信号转换为二维时频图,并将其作为训练卷积神经网络的输入,然后利用卷积神经网络的自学习能力学习电机轴承故障类型和故障特征之间的深层联系。与其他方法相比,该方法具有较快的诊断速度和较高的准确性。牛嘉豪等^[28]提出将电流和

振动信号联合的无转速阶次分析法,并将其应用于电机轴承故障诊断,该方法具有更高的精确性且适用性更强。Lu S等^[29]设计了一种适用于变速条件下永磁同步电机轴承在线故障诊断的方法。该方法将电机电流和轴承振动信号分析相结合,并在嵌入式系统中通过依次执行算法来对电机轴承故障进行在线诊断。考虑到电流信号和振动信号易于采集,因此该方法在永磁同步电动机变速轴承故障快速在线诊断中具有潜在的应用价值,适用于无法在永磁同步电动机上安装转速表/编码器的情况。Wang X等^[30]提出了一种根据电机电流估计旋转角度的电机轴承故障诊断方法。该方法采用变分非线性调频模态对电流信号进行分解,并提取出与电机转速有较强相关性的主模态;利用计算得到的旋转角度曲线对同步振动信号进行重采样;根据重采样信号的包络阶谱确定轴承故障类型。该方法能准确诊断轴承故障,在电机状态监测中具有潜在的应用价值。任巍曦等^[31]提出一种基于数字孪生的电机轴承故障诊断方法,以解决轴承故障样本数据稀少和故障诊断率低的问题。利用希尔伯特-黄变换增强了电机轴承的振动信号,降低了振动信号噪声,提高了电机轴承故障诊断的准确性与稳定性。

电机轴承故障时产生的振动会产生一定频率的噪音。通过采集噪声信号进行故障诊断的方法优点是不需要使用振动加速度传感器,从而降低了成本;缺点是噪声信号中干扰很多,难以准确地提取出故障特征,且此方法的应用场景有限制,背景噪声太强烈时故障诊断的准确性并不高。而将电流信号与振动信号相结合的方法可以有效解决此类问题。因此,振动信号与其他故障特征信号相结合的永磁同步电机轴承故障诊断方法将会成为未来的研究热点。

3 电气故障诊断方法

3.1 定子匝间短路故障诊断方法

永磁同步电机定子匝间短路故障会直接导致定子电流、阻抗以及振动频率发生变化,而这些特征信号恰好可以作为定子匝间短路故障的诊断依据^[32]。目前,永磁同步电机定子匝间短路故障的诊断方法大多基于各种状态参数来判断电机的运行状态和故障位置。

张业成等^[33]提出一种基于电机同相与异相电流幅值波动特征的故障分类诊断方法,该方法可以解决永磁同步电机匝间短路故障与局部退磁故障难以区分的问题。当电机在半载条件且处于故障状态下运行时,赵洪森等^[34]通过研究负序电流大小与短路故障程度及位置的变化关系,进而对电机定子内部短路故障进行诊断。以上诊断方法都是通过单一故障特征信号来反映电机的故障情况,该方法的局限性在于

单一故障特征量难以精准地判别电机故障的发生,容易产生误判、漏判的情况。

因此,李垣江等^[35]将采集到的永磁同步电机负序电流和转矩作为样本数据,利用生成对抗神经网络完成样本数据扩张,再结合稀疏自编码网络实现高效准确的故障特征分类与诊断。杭俊等^[36]利用电流残差矢量模平方中的二次谐波幅值和初始相位角来构建故障检测指标和故障相定位指标,以此来实现定子匝间短路故障诊断。丁石川等^[37]提出了一种基于永磁同步电机模型预测控制系统的价值函数,采用模型预测控制系统中价值函数的直流分量和二次谐波分量对永磁同步电机匝间短路故障进行诊断。Moon S等^[38]提出了一种利用电压和电流残差分量实现对永磁同步电机匝间短路故障诊断的方法。该方法可以有效地诊断电机定子匝间短路故障。

综上所述,永磁同步电机定子匝间短路故障的诊断方法大多是基于特征信号处理的方法。研究表明,相比于单故障特征信号,融合多故障特征信号以及对故障特征信号进行预处理的故障诊断方法能有效降低环境因素对单特征信号的影响,并且可以提高故障诊断的准确性,此方法适应于对故障诊断精度要求较高的领域^[39]。

3.2 驱动器系统故障诊断方法

3.2.1 电流传感器故障诊断方法

电流传感器故障作为永磁同步电机驱动系统的故障类型之一,其故障可以直接导致电机控制系统失效^[40]。因此提高系统的容错能力以及快速诊断故障位置是保证电机驱动系统可靠运行的重要手段。目前,针对电流传感器故障的诊断方法分为基于模型的诊断方法^[41-43]和基于信号的诊断方法^[44-46]。

Dan H等^[41]将有限控制集模型预测控制方法应用于基于矩阵变换器的永磁同步电机驱动系统,并根据提取的输出电流传感器故障的不同故障特征对电流传感器故障进行诊断。该诊断方法简单易行且无需任何冗余硬件。应黎明、Zhang G等^[42-43]针对永磁同步电机驱动系统电流传感器开路故障问题,提出了基于滑模观测器的故障检测方法。首先建立了系统的滑模观测器模型,在得到系统输出电流后,利用预测值与系统实际输出值的残差分析作为系统的传感器故障检测条件。

EI khil S K等^[44-45]将两线永磁同步电机定子电流乘积的归一化平均值和归一化平均电流的极性作为电流传感器故障特征信号,并对传感器故障进行了诊断。由于所提方法仅需对电机定子电流进行分析,故具有低调谐工作量以及良好的鲁棒性和可靠性。张晗等^[46]提出基于二次差分的电流传感器故障诊断

方法。该方法通过判断当前电流残差与阈值的关系来对故障传感器进行定位。并通过计算电流传感器输出电流的二次差分 and 周期电流积分来辨识故障类型。该方法能够对电流传感器的短线故障、卡死故障、偏置故障、增益故障等四种典型故障类型做出准确辨识,并通过对电流残差法的周期性重构增强了算法的鲁棒性。EI khil S K 等^[44]对永磁同步电机定子电流进行了分析,并将电流归一化平均值和不同相位两电流乘积的归一化平均值作为诊断信号,对电流传感器故障进行诊断。所提出的诊断方法不需要有关系统的任何信息,并且仅使用测量的电流信号。因此,具有诊断速度快、鲁棒性和可靠性高的优点。

对于上述电流传感器故障的诊断方法中,基于模型的诊断方法很大程度上依赖于模型的精确性,而且计算较为复杂;基于信号的诊断方法则需要对包含在测量信号中的故障信息进行提取,再与正常系统特征进行对比分析才能完成对传感器的故障诊断;基于状态观测器的诊断方法具有诊断速度快和准确性高的优点。

3.2.2 位置传感器故障诊断方法

永磁同步电机的转子位置信息可通过位置传感器或软件估计的方法得到。目前,无位置传感器技术研究已经趋于成熟^[47],但通过传感器对转子位置信息直接进行测量仍是应用最广、最可靠的方法。当永磁同步电机受恶劣工作环境的影响时,位置传感器在运行过程中相对容易发生故障^[48]。

Akrad A 等^[49]将速度传感器的转子位置实际输出值与扩展卡尔曼滤波器获得电机转子位置的估计值进行对比,进而实现位置传感器的故障诊断。但是在电机处于极低转速时,该方法不能对转子位置进行准确的观测。为了保证电机安全持续的运行,驱动器必须具备对位置传感器故障的鲁棒性。因此,Mwasilu F 等^[50]提出了一种自适应扩展卡尔曼滤波器的位置传感器故障诊断方法,相比于传统固定协方差矩阵的扩展卡尔曼滤波器,该方法对系统的随机噪声和瞬态运行工况具有较强的鲁棒性,且对位置传感器的故障诊断更加准确。孙宁等^[51]将电机驱动系统输入、输出功率之间的关系作为选取故障特征信号的依据,通过故障特征信号来检测旋转角度误差,并利用旋转角度与故障特征信号之间的关系估算误差角度,从而实现位置传感器的故障诊断。该方法能够实现位置传感器故障的精确诊断,而且可以对故障时的角速度误差进行补偿,以维持系统的稳定运行。董亮辉等^[52]对霍尔信号的状态和跳变沿中所包含的转子位置信息进行了分析,并将状态值与跳变沿之间的关系作为位置传感器故障诊断的依据。该方法在原有方

法的基础上,极大地提高了故障诊断的效率,明显减小了故障恢复过程中电流和转速的波动,提高了系统的可靠性和安全性。

综上所述,基于模型法的位置传感器故障诊断方法是通过比较观测器的估计值与传感器检测值得到的残差来获取位置传感器的故障信息。基于此的故障诊断方法在保证故障诊断准确性的同时,也可为后续的容错控制提供相应的转子位置和转速信息。

3.2.3 速度传感器故障诊断方法

速度传感器是永磁同步电机矢量控制系统中的重要组成部分,当其出现故障时会对电机的控制系统造成严重影响^[53]。因此,当速度传感器发生故障时,及时地对其进行故障诊断和容错控制是确保电机安全运行的重要措施。速度传感器故障诊断的方法可以分为硬件法和软件法。硬件法是通过硬件电路完成对速度传感器的故障诊断。硬件法具有诊断速度快,不占用处理器资源的优点;但硬件法一般只适用于特定类型的速度传感器,如光电编码器和旋转变压器等。而软件法适用于各种类型的速度传感器^[54]。

富历新等^[55]通过检测速度传感器 A、B、Z 三路信号输出,实现对速度传感器的故障诊断。但该方法只适用于光电编码的速度传感器。Tabbache B 等^[56]利用算法从虚拟传感器中计算出准确的速度信息,通过对比分别从速度传感器与虚拟传感器中获得速度信息,从而实现速度传感器的故障诊断。针对双三相永磁同步电机速度传感器故障,Xiao L、张潇丹、Wang X 等^[57-59]提出了一种集成扩展滑模观测器的新型协同控制器的鲁棒非线性控制方法,并采用优化方法获得了新型协同控制器的最优参数。该控制方案不仅提高了速度传感器在运行参数变化时的动态性能,还可以诊断速度传感器的故障,从而实现容错控制。周桂法等^[60]提出了一种基于 RBF 神经网络的速度传感器故障诊断方法,该方法将速度传感器的实际采样数据与预测器数据作差,将差值与某阈值进行比较从而实现速度传感器的故障诊断。该方法具有诊断速度快、故障诊断准确率高的优点。

综上所述,基于硬件方法的速度传感器诊断技术在应用范围上具有一定的局限性;而基于软件方法的诊断技术则具有快速准确的优点,且无需增加系统成本,更具有实用价值。

3.2.4 驱动器故障诊断方法

永磁同步电机驱动器主要由逆变器组成,逆变器是整个电机驱动系统的“心脏”^[58]。由于逆变器功率电路的脆弱性及其控制的复杂性,使得逆变器成为电机驱动系统中最易发生故障的部件。因此,及时准确地对逆变器故障进行诊断并采取容错控制,对于电机

驱动系统具有重要的意义^[61]。

目前,逆变器常用的故障诊断方法有:基于电流的故障诊断法^[62-64]、基于电压的故障诊断法^[65-67]、观测器残差法^[68]以及其他方法^[69-70]。徐琛杰等^[62]对电机健康状态下的模型进行了模拟,并将其与实际电机输出电流的残差值作为特征信号,提取三相残差的比例关系作为故障诊断依据,并在此基础上对逆变器开路故障进行了诊断。于泳等^[63]利用离散傅里叶变换得到定子电流的基波幅值和直流分量,然后根据基波幅值大小对直流分量进行了归一化处理,再根据归一化后的直流分量大小对逆变器的故障进行了诊断。该方法解决了传统逆变器故障诊断时负载的敏感性问题。针对永磁同步电机直接转矩控制系统中的逆变器出现单个功率开关管短路、开路与一相桥臂开路的故障问题,孙丹等^[64]提出一种基于相空间重构技术的逆变器故障诊断方法。该方法通过分析逆变器正常与故障状态下一相电流的轨迹特征,再结合所设计的模糊C均值聚类算法实现逆变器的故障诊断。

黄堃等^[65]则以电机电压为故障特征信号,通过对电机电压的实时监测,构建无电压传感器的二阶滑模观测器,将逻辑动态模型提供的电压先验信息与包含故障信息的实际电压输出值进行比较,准确定位故障开关管,从而实现逆变器故障的诊断。Khomfoi S等^[66]提出了一种基于神经网络的多电平逆变器故障诊断方法,该方法将电压信号处理后作为故障特征信号,利用5个多层感知器网络从逆变器输出电压测量中诊断故障的类型和位置。该方法具有良好的故障特征分类能力,可以更好地对逆变器故障进行检测和诊断。Cai B等^[67]提出一种基于贝叶斯网络的三相逆变器数据驱动故障诊断方法。该方法对不同故障模式的两个输出线电压进行测量,利用快速傅里叶变换提取特征信号,最后利用贝叶斯网络进行故障诊断。

彭伟发等^[68]提出一种基于电流残差的永磁同步电机驱动系统逆变器开路故障诊断方法。该方法将实际检测电流引入构造的观测器中,这样可以避免受到观测误差和时间延迟带来的影响。由于残差量与逆变器发生开路故障的时间成正比,因此时间越长,残差量就越大,故障就越容易被检测。该方法不仅摆脱了负载和主控制器的影响,而且具有可靠性高、反应迅速的优点。

此外,Potamianos P G等^[69]提出了一种基于离散小波变换分析的逆变器输出电流波形的故障诊断方法。该方法在设计监测系统中融入了模糊专家系统。由于该方法不使用额外的传感器,且不需要来自

控制算法的调制参数或应用脉冲序列的信息,因此实现成本较低,且有利于模块化的设计。Huang Z等^[70]在不增加硬件的情况下,为了使永磁同步电机逆变器故障诊断方法的设计、调试和实现更加方便、成本更低,提出了一种新的多开关故障诊断方法。该方法采用低频处理方法从控制器的反馈信号中获取小的低频数据,并通过单极值归一化方法对这些小的低频数据进行处理,从处理后的小低频数据的失真部分和包络变化中提取主要故障成分和特征,再将回声状态网络与提取的特征相结合,便可以实现故障的智能分类。

在基于电压电流信号的逆变器故障诊断领域中,除了上述方法之外还有很多的研究思路 and 方向。例如:高频电流注入法^[71]、Park 矢量法^[72]、相间极电压偏差法等^[73]。就观测器残差法而言,未来的研究方向主要在于提高对应系统输入扰动和模型误差的鲁棒性以及提高故障检测的灵敏度等方面。

4 永磁同步电机故障诊断的发展趋势

上述归纳了永磁同步电机永磁体故障、电路故障、机械故障的诊断方法后,今后永磁同步电机故障诊断的研究热点与发展趋势有以下几方面。

(1) 故障诊断的快速性。要实现电机故障快速诊断前提是必须先满足电机故障特征量选取的可靠性,而系统一般都存在时延问题,因此在选取故障特征量时必须考虑时延的影响,以保证时延对故障特征量影响很小甚至可忽略不计。此外,还应实现故障特征量的实时在线获取,这就要求在故障特征量的提取技术上也需满足相关要求。因此,必须研究一种快速可靠的电机故障诊断方法。

(2) 故障的分类诊断研究。某些研究对象(如位置传感器)一般存在不只一种的故障类型,最有效的故障诊断策略是不仅要实现故障快速诊断,还要实现故障类型的检测,从而实现对故障类型的判断,这对故障后的响应策略和容错控制策略具有指导意义。

(3) 基于人工智能的故障诊断方法。人工智能具有模拟人类分析和解决问题的智能行为,适用于难以用数学模型分析和解决的问题研究。因此,人工智能技术的发展为永磁同步电机故障诊断开辟了新的途径和方法,使系统故障诊断方法的智能化程度得到提高。例如:遗传算法、神经网络算法、模糊理论算法、专家系统算法等。其次,基于人工智能方法的联合诊断方法也将成为未来研究热点。例如:专家系统与神经网络的结合,模糊逻辑与神经网络的结合等。

(4) 多故障特征信号联合诊断。基于单一故障特征信号的永磁同步电机故障诊断方法难以精准地判别电机故障的发生,容易产生误判、漏判的情况。

而融合多故障特征信号的电机故障诊断方法能够弥补这一缺陷,从而使电机故障诊断的可靠性和准确性大幅提升。

(5) 大数据、工业物联网、人工智能技术的发展促进了数字孪生技术与电气设备故障诊断的深度融合。基于数字孪生的电机故障诊断方法能够准确表征数据特征并进行高效精准计算分析,为实际物理系统的状态评估和故障诊断提供了可靠的技术支持。

5 结 语

目前,关于永磁同步电机故障诊断方法仍处于理论研究阶段,并且或多或少都存在相应的缺点,因而其未能被广泛地应用到实际工程中,因此需要在实际工程中不断地实践和完善才能达到精准诊断故障的目的。文章分析总结了在永磁同步电机故障诊断过程中所面临问题以及解决这些问题所采用的方法,并阐述了永磁同步电机故障诊断技术的未来发展趋势,可以为未来快速化、集成化、智能化和高精度化的永磁同步电机故障诊断技术的发展提供参考。

参考文献:

[1] 郝振洋,胡育文.电力作动器用高可靠性永磁容错电机控制系统的设计及其试验分析[J].航空学报,2013,34(1):141-152.

[2] Henao H, Capolino G A, Fernandez-Cabanas M, et al. Trends in Fault Diagnosis for Electrical Machines: A Review of Diagnostic Techniques[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(2): 31-42.

[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):548-558.

[4] 刘 铄,宋俊材,陆思良,等.基于灰度纹理特征提取和CS-SNN的双初级永磁同步直线电机退磁故障诊断研究[J].中国电机工程学报,2023,43(16):6464-6474.

[5] 张志艳,马宏忠,陈 诚,等.永磁电机失磁故障诊断方法综述[J].微电机,2013,46(3):77-80.

[6] Barmpatza A C, Kappatou J C. Study of a Combined Demagnetization and Eccentricity Fault in an AFPM Synchronous Generator[J]. Energies, 2020, 13(21): 1-17.

[7] Gherabi Z, Toumi D, Benouzza N, et al. Discrimination between demagnetization and eccentricity faults in PMSMs using real and imaginary components of stator current spectral analysis[J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21(1): 153-163.

[8] Song X, Zhao J, Song J, et al. Local Demagnetization Fault Recognition of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Based on S-Transform and PSOLSSVM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 7816-7825.

[9] Espinosa A G, Rosero J A, Cusidó J, et al. Fault Detection by Means of Hilbert-Huang Transform of the Stator Current in a PMSM With Demagnetization[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 312-318.

[10] Ruiz J R R, Rosero J A, Espinosa A G, et al. Detection of Demagnetization Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors Under Nonstationary Conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics,

2009, 45(7): 2961-2969.

[11] 丁石川,何 旺,杭 俊,等.基于径向气隙磁密和定子电流的永磁同步电机均匀退磁故障诊断研究[J].中国电机工程学报,2024,44(1):332-341.

[12] Farooq J, Srairi S, Djerdir A, et al. Use of permeance network method in the demagnetization phenomenon modeling in a permanent magnet motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1295-1298.

[13] 刘颖明,张天琦,王晓东,等.永磁同步风力发电机匝间和退磁故障早期检测[J].太阳能学报,2022,43(10):252-258.

[14] 高彩霞,聂言杰,司纪凯,等.直驱永磁同步电机均匀退磁性能分析和故障诊断[J].煤炭学报,2018,43(S2):615-622.

[15] 杨冀堃,张建民.基于EKF的PMSM失磁故障在线诊断方法[J].机床与液压,2023,51(19):211-215+228.

[16] 何 静,张昌凡,贾 林,等.一种永磁同步电机的失磁故障重构方法研究[J].电机与控制学报,2014,18(2):8-14.

[17] 宋雪玮,赵吉文,董 菲,等.基于PSO-LSSVM的永磁同步直线电机局部退磁故障识别[J].中国电机工程学报,2019,39(8):2426-2435+25.

[18] 朱显辉,崔淑梅,师 楠,等.电动汽车电机可靠性的灰色预测模型[J].电机与控制学报,2012,16(8):42-46.

[19] 张 冉,王秀和,杨玉波,等.基于等效剩磁法的永磁电动机转子偏心磁场解析计算[J].电工技术学报,2009,24(5):7-12.

[20] Park Y, Yang C, Lee S B, et al. Online Detection and Classification of Rotor and Load Defects in PMSMs Based on Hall Sensor Measurements [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3803-3812.

[21] Park Y, Fernandez D, Lee S B, et al. Online Detection of Rotor Eccentricity and Demagnetization Faults in PMSMs Based on Hall Effect Field Sensor Measurements [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2499-2509.

[22] 杨存祥,牛云龙,张志艳,等.小波包分析在永磁同步电机转子偏心故障中的应用[J].电机与控制应用,2015,42(4):42-46.

[23] 李全峰,黄厚佳,黄苏融,等.表贴式永磁电机转子偏心故障快速诊断研究[J].电机与控制学报,2019,23(12):48-58+67.

[24] Zeng C, Huang S, Lei J, et al. Online Rotor Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Stator Tooth Flux [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 2366-2377.

[25] Tavner P J. Review of condition monitoring of rotating electrical machines [J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(4): 215-247.

[26] 杨春洁.基于小波去噪的机车牵引电机轴承故障诊断仿真研究[J].中国设备工程,2019(13):117-119.

[27] 王春雷,路小娟.一种基于深度学习的电机轴承故障诊断方法[J].兰州交通大学学报,2020,39(2):43-50.

[28] 牛嘉豪.基于无转速计阶次分析的电机轴承故障诊断方法研究[D].合肥:安徽大学,2020.

[29] Lu S, He Q, Zhao J. Bearing fault diagnosis of a permanent magnet synchronous motor via a fast and online order analysis method in an embedded system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018(113):36-49.

[30] Wang X, Lu S, Zhang S. Rotating Angle Estimation for Hybrid Stepper Motors With Application to Bearing Fault Diagnosis [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69

- (8):5556-5568.
- [31] 任巍曦,张文煜,李明,等.基于数字孪生的风电机组轴承故障诊断方法研究[J].弹箭与制导学报,2022,42(3):97-104.
- [32] 李俊卿,王栋.双馈感应发电机转子匝间短路时定子电流谐波分析[J].电力系统自动化,2014,38(21):71-76.
- [33] 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+1653.
- [34] 赵洪森,戈宝军,陶大军,等.同步发电机定子绕组匝间短路故障诊断研究[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(1):99-104.
- [35] 李垣江,张周磊,李梦含,等.采用深度学习的永磁同步电机匝间短路故障诊断方法[J].电机与控制学报,2020,24(9):173-180.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Moon S, Jeong H, Lee H, et al. Interturn Short Fault Diagnosis in a PMSM by Voltage and Current Residual Analysis With the Faulty Winding Model [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017,33(1):190-198.
- [39] 王栋悦,谷怀广,魏书荣,等.基于机电信号融合的DFIG定子绕组匝间短路故障诊断[J].电力系统自动化,2020,44(9):171-178.
- [40] 李小庆,朱景伟,孙军浩,等.双绕组永磁容错电机矢量控制系统研究[J].电工技术学报,2016,31(5):26-34.
- [41] Dan H, Yue W, Xiong W, et al. Open-Switch and Current Sensor Fault Diagnosis Strategy for Matrix Converter-Based PMSM Drive System [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022,8(1):875-885.
- [42] 应黎明,杭翠琴,舒乃秋,等.永磁同步电机传感器故障诊断及容错控制[J].电机与控制学报,2020,24(1):45-52.
- [43] Zhang G, Zhou H, Wang G, et al. Current Sensor Fault Tolerant Control for Encoderless IPMSM Drives Based on Current Space Vector Error Reconstruction[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2019,8(4):3658-3668.
- [44] El khil S K, Jlassi I, Cardoso A M, et al. Diagnosis of Open-Switch and Current Sensor Faults in PMSM Drives Through Stator Current Analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019,55(6):5925-5937.
- [45] El khil S K, Jlassi I, Estima J O, et al. Detection and isolation of open switch and current sensor faults in PMSM drives, through stator current analysis [C].2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2017:373-379.
- [46] 张晗,徐帅,马光同,等.基于二次差分的永磁同步电机电流传感器故障诊断方法[J].电机与控制应用,2022,49(4):95-102.
- [47] 宋文祥,任航,叶豪.基于MRAS的双三相永磁同步电机无位置传感器控制研究[J].中国电机工程学报,2022,42(3):1164-1174.
- [48] Kuruppu S S, Zou Y. Static Position Sensor Bias Fault Diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Machines via Current Estimation [J].IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2021,26(2):888-896.
- [49] Akrad A, Hilairret M, Diallo D. Design of a Fault Tolerant Controller Based on Observers for a PMSM Drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,58(4):1416-1427.
- [50] Mwasilu F, Jung J W. Enhanced Fault Tolerant Control of Interior PMSMs Based on an Adaptive EKF for EV Traction Applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016,31(8):5746-5758.
- [51] 孙宁,孙天奎,杜博超,等.PMSM驱动系统位置传感器偏转故障的诊断与容错[J].电气传动,2013,43(5):3-7.
- [52] 董亮辉,刘景林.永磁同步电机位置传感器的故障检测和容错控制[J].西北工业大学学报,2016,34(2):306-312.
- [53] 周长攀,苏健勇,杨贵杰,等.基于双零序电压注入PWM策略的双三相永磁同步电机矢量控制[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2522-2533.
- [54] 于泳,蒋生成,王高林,等.基于状态观测器的感应电机速度传感器故障诊断及容错控制[J].中国电机工程学报,2012,32(18):123-130+186.
- [55] 富历新.一种光电码盘输出线断路检测和保护电路[J].微电机,1993(3):56-57.
- [56] Tabbache B, Benbouzid M E H, Kheloui A, et al. Virtual Sensor Based Maximum Likelihood Voting Approach for Fault Tolerant Control of Electric Vehicle Powertrains [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013,62(3):1075-1083.
- [57] Xiao L, Zhang L, Gao F, et al. Robust Fault Tolerant Synergetic Control for Dual Three-Phase PMSM Drives Considering Speed Sensor Fault [J]. IEEE Access, 2020(8):78912-78922.
- [58] 张潇丹,段斌,刘昌杰,等.基于本体追踪的永磁同步电机驱动系统开路故障诊断方法[J].电工技术学报,2022,37(13):3341-3349+3360.
- [59] Wang X, Wang Z, Xu Z, et al. Comprehensive Diagnosis and Tolerance Strategies for Electrical Faults and Sensor Faults in Dual Three-Phase PMSM Drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019,34(7):6669-6684.
- [60] 周桂法,王坚.基于神经网络的机车速度传感器故障诊断方法研究[J].机车电传动,2010(1):36-38.
- [61] Orłowska-Kowalska T, Wolkiewicz M, Pietrzak P, et al. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of PMSM Drives State of the Art and Future Challenges [J]. IEEE Access, 2022(10):59979-60024.
- [62] 徐琛杰,章玮.基于统一模型的永磁同步电机故障诊断[J].电机与控制学报,2022,26(4):9-17.
- [63] 于泳,蒋生成,杨荣峰,等.变频器IGBT开路故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2011,31(9):30-35.
- [64] 孙丹,孟潜,管宇凡,等.基于相空间重构和模糊聚类的永磁同步电机直接转矩控制系统逆变器故障诊断[J].中国电机工程学报,2007(16):49-53.
- [65] 黄堃,张楠,黄麟.双Y移30°永磁同步电机逆变器开路故障诊断方法[J].微电机,2020,53(1):84-88.
- [66] Khomfoi S, Tolbert L M. Fault Diagnostic System for a Multilevel Inverter Using a Neural Network [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007,22(3):1062-1069.

- horizontal axis wind turbine blades[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1998, 120(2): 115-120.
- [11] 陈岩松, 朱才朝, 谭建军, 等. 多工况下兆瓦级海上风电齿轮箱均载性能优化设计[J]. 重庆大学学报, 2022(9): 1-14.
- [12] 张世越, 吴昊. 基于顺序雨流法和临界平面法的多轴变幅低周疲劳寿命评价[J]. 力学季刊, 2020(3): 465-476.
- [13] 朱林, 陈敏, 贾民平, 等. 数据驱动下孪生贝叶斯理论非齐次泊松过程的结构损伤评估方法[J]. 振动工程学报, 2021, 34(1): 134-140.
- [14] 阳志光, 郭晨宇, 杨帆, 等. 基于集成学习的冲击载荷识别与定位方法[J]. 强度与环境, 2022, 49(5): 129-137.
- [15] 马爽. 地铁转向架构架载荷谱建立方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [16] 谭建军, 伍源, 白杨, 等. 考虑环境参数的风电齿轮箱传动系统疲劳性能优化[J]. 机械传动, 2023, 47(8): 53-63.
- [17] 胡玥. 大型风电齿轮箱浮动构件的均载分析与优化[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [18] 林湘宁, 丁苏阳, 张哲原, 等. 一种计及等效损伤载荷约束的风机黏性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1951-1961+2210.
- [19] 宋礼睿, 崔权维, 周建星, 等. 风电齿轮箱高速轴承疲劳寿命及动态可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 437-444.
- [20] 段同江. 风电齿轮箱轴承寿命与游隙载荷转速的关系曲线分析[J]. 哈尔滨轴承, 2019, 40(4): 14-17+25.
- [21] Su Y S, Yu S R, Li S X, et al. Review of the damage mechanism in wind turbine gearbox bearings under rolling contact fatigue[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(4): 434-441.
- [22] Keller J, Guo Y, Zhang Z, et al. Comparison of planetary bearing load-sharing characteristics in wind turbine gearboxes[J]. Wind Energy Science, 2018, 3(2): 947-960.
- [23] 历海宁. TY型风电齿轮箱行星传动系统动力学分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.

(上接第167页)

- [67] Cai B, Zhao Y, Liu H, et al. A Data-Driven Fault Diagnosis Methodology in Three-Phase Inverters for PMSM Drive Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5590-5600.
- [68] 彭伟发, 黄苏融. 永磁同步电机驱动系统逆变器故障诊断研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 1965-1971.
- [69] Potamianos P G, Mitronikas E D, Safacas A N. Open-Circuit Fault Diagnosis for Matrix Converter Drives and Remedial Operation Using Carrier-Based Modulation Methods[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 531-545.
- [70] Huang Z, Wang Z, Yao X, et al. Multi-Switches Fault Diagnosis Based on Small Low-Frequency Data for Voltage-Source Inverters of PMSM Drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6845-6857.
- [71] Lu J, Hu Y, Zhang X, et al. High-frequency voltage injection senseless control technique for IPMSMs fed by a three-phase four-switch inverter with a single current sensor[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(2): 758-768.
- [72] Bae C J, Lee D C, Nguyen T H. Detection and identification of multiple IGBT open-circuit faults in PWM inverters for AC machine drives[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(4): 923-931.
- [73] Chen M, He Y, Sui C. Open-circuit fault diagnosis in three-level rectifiers based on selective calculation method for instant voltage deviation[J]. IET Power Electronics, 2021, 14(5): 923-935.

· 写作小知识 ·

标点符号知识问答

问:句中可以用冒号套冒号吗?

答:在列举式或条文式表述中,如不得不套用冒号时,宜另起段落显示各个不同层次。

第十条 遗产按照下列顺序继承:

第一顺序:配偶、子女、父母。

第二顺序:兄弟姐妹、祖父母、外祖父母。

问:用引号时,标点放在引号里边还是外边?

答:1.凡是引用的话独立来用,末尾的标点放在引号里边。

“青山遮不住,毕竟东流去。”改革的历史潮流不可阻挡。

2.凡是引用的话作为作者自己的话的一部分,标点符号放在引号外边。

小说家创作历史小说如何对待史实,鲁迅说了两种情况:一种是“博考文献,言必有据”,一种是“只取一点因由,随意点染,铺成一篇”。

3.先引用对话,话未说完,中间又交代说话人和夹叙说话人的情态这种形式的对话,夹叙文字前不管引用的对话完整与否,句号都要放在引号里边。而夹叙文字后不能用冒号或句号,只能用逗号,表示前后两段话是一个人说的,是连在一起用的。

“他景况很不如意……”母亲说着,便向房外看,“这些人又来了。我得去看看”。

摘自《甘肃审读简报》2023年第8期