

综述·评论

永磁电机故障诊断和容错技术概述

柯思勤

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 永磁电机在国内一些关键装备领域(如轨道交通、电动汽车、风力发电)的应用日益增加, 这些领域对电机的可靠性提出很高的要求。永磁电机由于存在旋转的永磁体, 即使定子已断电, 对电机的损坏行为仍将继续, 因此电机状态监测、故障诊断及容错控制对维持系统安全可靠十分重要。文章阐述了永磁电机状态监测和故障诊断技术的发展近况, 特别介绍了转子去磁、定子绕组匝间短路、转子偏心等故障的诊断方法及在非稳态下故障诊断、故障容错运行控制方法, 指出系统故障预诊断和健康管理技术是未来发展方向。

关键词: 永磁电机; 状态监测; 故障诊断; 电信号分析; 去磁; 匝间短路; 偏心; 容错控制; 非稳态

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)02-0011-06

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.02.002

Review on Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control for Permanent Magnet Electrical Machines

KE Siqin

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Permanent magnet electrical machines (PME) have started to be more preferred in some safety critical application fields such as rail-transit, electric vehicle, wind power generation etc, and reliability of electrical machine is highly required in these fields. Due to the presence of rotating permanent magnets, damage to the machine will continue even if the stator is disconnected from the line, so condition monitoring, fault diagnosis techniques(CMFD) and fault tolerant control for PME are very important for system safe operation. It reviewed recent reports on CMFD for PME, specially diagnosis methods for faults such as rotor demagnetization, stator inter-turn short and eccentricity. Fault tolerant control and fault diagnosis under non-stationary condition for PME were also presented and prognosis and health management is pointed to be the trend in this field..

Keywords: permanent magnet electrical machine; condition monitoring; fault diagnosis; electric signal analysis; demagnetization; inter-turn short circuit; eccentricity; tolerant control; non-stationary condition

0 引言

电动机是电驱动系统中的关键部件, 承担着将电功率转换为机械功率的重要任务。20 世纪最常用的电动机是直流电动机, 随着电子功率器件及控制技术的迅速发展, 异步电动机变频驱动取而代之。21 世纪以来, 永磁电动机以其效率高、性能比好的优势, 在一些重要领域已取代异步电动机。在一些对安全、可靠性有

很高要求的领域, 如轨道交通、电动汽车、风力发电等, 电机的状态监测和故障诊断尤为重要, 因此一直以来受到高度重视。近年来, 随着信息技术的快速发展, 电机状态监测和故障诊断技术也有相应的进步。国内外在电机的状态监测与故障诊断领域开展了不少工作, 已有较多文献发表^[1-3], 但有关永磁电机方面的相关文献较少。本文仅就永磁电机状态监测和故障诊断技术, 特别对转子去磁、定子绕组匝间短路、转子偏心等故障的诊断方法及在非稳态下故障诊断、故障容错运行控制等作一些简要介绍^[4]。

收稿日期: 2016-12-20

作者简介: 柯思勤(1968-), 女, 工程师, 主要从事科技期刊编辑及科技文献研究工作。

1 状态监测

对电机进行状态监测的主要目的是监测电机状态的变化、辨别变化的原因(诊断)、预计在可见的未来电机的状态(预诊断)。故障的预测包含实质上的不确定性,因此预诊断是一项困难的工作,本文对此不作详细介绍。

状态监测的第一步是从各种传感器获取信号;第二步是信号调理,包括被测数据的初始处理;第三步是故障诊断。

1.1 状态信号检测

根据被测信号类别,状态监测包括电信号、磁信号、振动信号、温度状态及声学信号等检测方法。

1.1.1 电信号检测^[3]

电信号检测仅对电信号(如电流、电压)作评估,其优点是非侵入性、信号获取容易。特别是电流信号,只需利用系统已有的传感器便能获取,同时电流检测电路便于与保护和调速系统集成,实现成本低、难度小,因此本文主要关注电流检测方式。目前,电流信号分析法(motor current signal analysis, MCSA)已成为电机故障诊断最常用、最有效的方法,可以在线监测以发现早期故障。该方法对平稳信号能给出满意的结果,但无法用于非平稳信号的故障诊断,这是因为其所用的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)不适用于非稳态。

1.1.2 磁信号检测

磁信号检测是对被埋在定子槽内或放置在电机外部(如Rogowski线圈)的磁场测量线圈^[5]的信号进行评估。基于外磁场的方法,其优点为非侵入性,而且操作简单;缺点是磁场建模困难。外磁场可分解为轴向和径向。轴向磁场处于含电机轴线的平面内,是由定子绕组端部或鼠笼端环中的电流所产生;径向磁场处于与电机轴线垂直的平面内,它是气隙磁场的镜像,会受定子铁心及机座影响而衰减。在合适位置用测量线圈就可以测量外部漏磁场。例如,当定子绕组匝间短路时,气隙磁场出现了不对称,所产生的磁密分量将明显地出现在外部漏磁场中。值得一提的是,用外部漏磁场检测比用电流检测的灵敏度要高。据报道,轴向漏磁监测方法可以用来检测定子匝间短路、气隙偏心、转子断条、非全相运行等多种故障。

1.1.3 振动信号检测

振动信号检测是基于对振动加速度或速度的评估,一般采用压电传感器测取振动信号。机械的不平衡或故障难以由电信号来检测,因此用振动信号来检测由机械原因引起的故障更为合理。引起机械振动的原因可能是电气故障,也可能是机械故障。两者以不同的方式影响振动。例如,

机座的横向振动是由轴承磨损或转子偏心等原因所致,而这还是产生不平衡磁拉力的主要原因。这些力可能导致轴承的过早磨损。机械振动的检测有两种方法,一种是将加速度传感器安装在轴承座上,测量较高频率范围的振动;另一种是将加速度传感器安装在定子侧的机座上,对横向振动进行测量。一些电气故障也可以通过对振动信号的分析进行监测。文献[6]基于振动信号分析提出一种永磁同步电动机故障检测和隔离的方法,可用于监测转子偏心、去磁及定子绕组匝间短路等故障。

1.1.4 温度状态检测

温度状态检测可以通过直接测量方式或由状态观测器或模型方式进行。直接测量法是通过预先埋置在定子绕组、轴承等部位的温度传感器来进行检测温度信号,已被广泛采用;但受传感器数量和分布位置等因素限制,该方法有一定的局限性,特别是对转子温度,难以采用该方法获得。文献[7]基于永磁磁通与温度的敏感关系提出了一种磁通观测器,其通过对永磁同步电机转子磁通变化的观测来间接评估磁铁的温度。文献[8]介绍了几种关于转子磁铁温度的监测方法,如热模型、磁通观测器及电压信号注入方式等并对其优缺点进行了评估。

1.1.5 声学信号检测

声学信号检测是基于电机发出特殊声音的状态,但测量结果与电机运行环境的背景噪音有很大关系,因此很难在现实的工业环境中采用。随着数据分析技术的进步,文献[9]提出了一种声学信号的识别方法来诊断电机故障。

1.2 信号调理

通过传感器获得的信号称为原始信号,一部分可直接利用,如温度、位移等;但大部分由于含有丰富的噪声或谐波,这些信号必须经过处理。初始处理包括对被测数据进行滤波、变换、检测、频谱分析、估算、压缩、识别等一系列工作,处理后提取并分析特征信号,为下一步状态评估提供依据。

1.3 故障诊断

目前电机故障诊断方法可以分为3类:基于模型的方法、基于信号的方法及人工智能(artificial intelligence, AI)方法。

基于模型的方法,其采用数学模型来描述电机的运行状态,故障诊断速度快,能用于在线故障监测;但需要准确的电机模型,而且故障诊断残值不仅受系统故障影响,还受系统模型不确定性及干扰信号的影响。系统不确定性无法用数学建模,并且仿真模型与真实系统存在性能差异,可能对基于模型的故障诊断系统产生虚假残值。

基于信号的方法，其经初步处理后的信号需在不同的域内进行频率分析，以抽取更敏感、更能反映电机状态的特征量，然后将其与无故障理想状态下抽取的特征量进行对比。对于平稳信号，一般采用FFT时域分析或频域分析方法；而对于非平稳信号，要用时频域或小波分析法等更先进的方法来抽取特征量。该方法的主要优点是不需要电机的动态模型，但故障诊断处理速度较另两种方法的慢。目前，基于信号的故障检测方法主要分为两类，一种基于电流残值，另一种基于电压残值。基于电压残值的故障检测方法速度较快，抗干扰和虚假故障能力较强，但需要额外的电压传感器。基于电流残值的故障检测方法，由于电流传感器在系统中已存在，因此应用较普遍，但速度较慢，抗干扰能力也较差。

基于人工智能的方法包括专家系统 (expert system)、模糊逻辑 (fuzzy logic)、人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 及支持矢量机 (support vector machine, SVM) 等，是用于复杂系统的故障诊断最流行的手段。其中 ANN 要求具有强大的计算能力，适合检测逐步发展的故障。专家系统常采用查询表，因此反应速度很快；其缺点是领域内专家的经验知识可能无法被有效表达。

2 永磁电机故障及其诊断

永磁电机由于存在旋转的永磁体，即使定子已从电源断开，对电机的损坏行为仍将继续。因此对永磁电机，不仅需要在设计和制造工艺上强调可靠性，而且状态监测及容错运行对电机的可靠运行也具有十分重要的意义。永磁电机故障可分为电气故障（系统和绕组故障）、机械故障（轴承故障和偏心）和磁性故障（去磁）。轴承故障及其检测已有很多专门文献报道，可参见文献 [10–11]，因此这里不作介绍。下面主要就去磁、定子绕组短路及转子偏心等故障的诊断方法等进行阐述。

2.1 转子去磁故障

通常，启动电流大、由瞬态到稳态迅速变化时的电枢反应作用等因素易使永磁电机产生去磁故障，尤其是在高温及弱磁同时存在的工况下，电枢反应作用更容易使磁铁磁通发生不可逆的损失。去磁故障的结果是导致电机效率降低、振动及噪声增加。目前，在对安全有很高要求的领域，其使用的电机在设计上采取有效措施以降低电枢反应的去磁作用并采用高温磁铁如钐钴（Sm-Co）磁铁等来提高电机本身的抗去磁能力^[12]。与此同时，加强对去磁故障的监测也十分重要。产生局部去磁故障后，在FFT频谱中会出现附加的边带分量，这些边带分量在频带中的位置可由式 (1) 给出：

$$f_{dm} = f_s \left(1 \mp \frac{k}{p} \right)$$
 (1)

式中： f_s ——电源频率； p ——极对数； k ——正整数。
检测转子磁铁缺陷的一种方法是估算在同步参考系中 d 轴定子绕组磁链值。磁铁 d 轴磁通与定子绕组的磁链 $\hat{\lambda}_{d(pm)}^e$ 由式 (2) 给出。磁铁的磁场强度用 $\hat{\lambda}_{d(nm)}^e$ 的平均值来衡量。

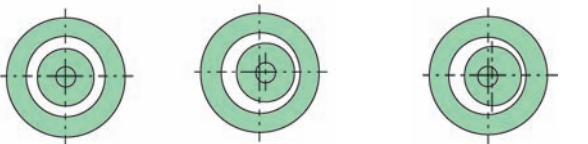
$$\hat{\lambda}_{d(pm)}^e = \frac{V_{qs}^e - r_s i_{qs}^e}{\omega_e} - L_{ds}^e i_{ds}^e$$
 (2)

式中： i_{ds}^e —— d 轴定子电流瞬时值； i_{qs}^e —— q 轴定子电流瞬时值； V_{qs}^e —— q 轴定子电压瞬时值； L_{ds}^e —— d 轴定子电感瞬时值； r_s ——定子电阻； ω_e ——转子转速瞬时值。

文献 [13] 推荐一种角域 - 阶次比跟踪 (angular domain order tracking AD-OT) 方法对电流信号进行分析。该方法一直被成功用于振动信号分析，这是第一次将其用于对永磁电机电流的分析。为获得去磁磁通的大小和角度，文献 [14] 推荐了一种状态观测器，其基于数学模型而构建，将 d 轴和 q 轴在失磁后的磁通作为未知量输入，算法简单、快速，能满足在运行中实时监测的要求。文献 [15] 推荐了一种滑模状态观测器 (sliding observer) 用来隔离未知输入对残差产生的干扰。由于观测器的参数是由线性矩阵不等式而确定，故所产生的残差只对故障信号敏感，提高了故障检测的精度。用该方法对永磁电机去磁故障进行检测并定位，其效果得到了实际应用的验证。

2.2 转子偏心故障

转子偏心为机械故障。气隙偏心状况通常有两种类型：静态偏心 (SE) 和动态偏心 (DE) (图 1)。SE 是由定子内径的椭圆度或装配不良引起的，其偏心的位置在空间上是固定的。DE 是由转轴弯曲、轴颈为椭圆、机械共振、轴承磨损等原因引起。这两种状况也可能同时存在，称为混合偏心 (ME)。



(a) 正常转子 (b) 静态偏心转子 (c) 动态偏心转子

图 1 气隙偏心

Fig. 1 Eccentricity

由于偏心会产生不平衡拉力，使振动增大，导致绕组和机座松动、绝缘磨损，甚至定子和转子相磨。当气隙存在偏心时，气隙磁导沿圆周方向会出现不均匀现象，从而在定子电流中感应出谐波分量。这些特征谐波分量的频率为

$$f_{\text{偏心}} = [1 \pm (2k-1)/p]f_s \quad (3)$$

文献[16]采用时步有限元法(time-stepping finite element method, TSFEM)为存在偏心故障的永磁电机建模。永磁电机不同部件的几何和物理特性、气隙因定子槽引起的磁导不均匀性、永磁体的非线性特性、定子和转子铁心特性,这些因素在建模时均应考虑。用TSFEM法对定子电流进行运算,以此作为故障诊断的合适信号。因此给SE、DE和ME导入一种新的频率模式,从中抽取的边带分量幅值被用来诊断不同类型的偏心故障。偏心的类型由K型近邻分类器(K-nearest neighbor classifier)确定,最后用ANN对偏心程度进行评估。文献[17]为永磁电机的偏心故障引入一个新指数,其由定子电流在小波分解中基于能量、形状因素、幅值等因子抽取的信号来确定。用TSFEM为偏心故障的永磁电机建模,将定子电流作为合适信号处理。由K型近邻分类器确定偏心的类型,用模糊支持向量机(fuzzy support vector machine, FSVM)评定转子的偏心程度。文献[18]采用有限元分析法分析偏心故障。用离散小波变换法(discrete wavelet transform, DWT)从定子电流基于能量的计算结果中抽取特征信号对故障作评估。在永磁电机转速和转矩变化情况下,该算法可用于检测偏心及去磁故障。

2.3 定子绕组故障

定子绕组故障属电气故障,故障形式主要有5种,即匝间短路、线圈间短路、相间短路、线与地间短路和开路(图2)。故障起初是在同一线圈里发生匝间短路;故障若蔓延,则会发生相间短路,甚至发展成接地故障。在5种故障模式中,匝间短路被认为是最具挑战性的一种,因为另4种形式故障通常是匝间短路故障的延续,而匝间故障在起始阶段很难被检测到。

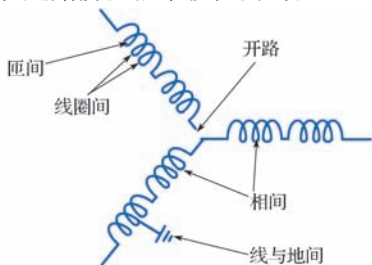


图2 Y型联结定子绕组故障模型

Fig. 2 Possible fault modes in Y-connected stator windings

传统的匝间故障检测方案几乎都是监测线电流的负序分量或负序阻抗,并依赖对称感应电机的数学模型来说明不平衡电源电压对负序电流的影响;如若忽略固有的不对称,则会导致误判。固有不对称问题可通过基于神经网络的方法引导出。虽然该技术用于异步电机效果很好,但并不适用于永磁电机。因为传动系统中的电流控制器会调节电流跟踪参考值;由于电流被调节,由故

障引起的不对称效果就反映到电动机的电压上。为此,推荐一种基于电压的匝间故障检测方法,但需要增加电压传感器及连线。

对存在匝间故障的电机建模,得出的结论是:匝间短路故障减小了电机阻抗及反电势的正序分量,但同时也增加了负序分量及阻抗矩阵里的耦合项。根据电压参考系中正序和负序分量的不同,可以判断并显示定子匝间短路故障的存在。

文献[19]将基于负序分析与模糊逻辑相结合的方法用于永磁电机定子故障的诊断。将负荷波动引起的高频成分从总负序电流中隔离,获得校正的负序电流。该电流分量提供对定子故障程度的数值评估。模糊逻辑的使用,提高了故障检测方法的灵敏度,从而降低了负荷波动时的虚警率。

文献[20]推荐的智能保护系统由2部分组成,其一是K型近邻分类器,用于检测系统从正常运行、相间故障及开路状态中辨识出匝间短路故障,同时检测出故障相;其二是基于改进引力搜索训练的智能神经网络(ANN trained with improved gravitation search algorithm),用来确定故障总量。

文献[21]推荐了一种基于定子电流Concordia图的图样分析和识别技术,用以确认定子绕组匝间短路故障及相应的故障程度指数,方法简单且在离线模式下工作,为在线状态监测的一个替代。故障程度指数FSI(式(4))在0和1间变化。

$$FSI = 1 - \frac{R_h}{R_f} \quad (4)$$

式中: R_h ——健康状态下电机圆图的半径; R_f ——故障状态下电机椭圆图的长轴半径。

3 非稳态下的永磁电机故障诊断技术

在轨道交通、电动汽车、风力发电等传动领域,永磁电机的运行状态通常是迅速变化的。短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)是非稳态状态下故障诊断的经典方法。这是一种线性时频表示(time frequency representation, TFR)分析技术,其简单但只适用于变化较慢的场合。

采用二次时频表示技术(quadratic TFR)作为非稳态状态下运行电机转子故障诊断的一个方法已被证明是切实、有效的。Wigner-Ville分布(WVD), Choi-Williams分布(CWD)及Zhao-Atlas Marks分布(ZAM)等二次TFR法被认为是处理非平稳信号的有力工具。时频分布技术虽然已被验证有效,但信息处理量大。

虽然二次 TFR (如 WVD 及 CWD) 比线性 TFR 的谱图计算密集度更高, 但能提供更好的频率分辨率, 且用 ZAM 分布法能量定位性能最好。CWD 是 WVD 优越的频率分辨率和 ZAM 高度交互项抑制间一个很好的折衷。然而, 最好的频率分辨率和良好的能量定位是以增加计算量为代价。若忽略复杂性增加的问题, 由于 CWD 的计算时间只有几十微秒, 因而能实时应用。近年来, DWT 或 Hilbert-Huang 变换 (HHT) 技术的采用, 为非平稳信号分析提供了更有力手段。

文献 [22] 针对风力发电机的非稳态运行工况, 采用瞬时对称分量分解法描述数值和复数带通滤波 (complex valued filtering) 来筛选基频附近的分量。为从基频附近抽取有用信息, 可在线使用文中提出的样本抽样 (sample-per-sample) 算法并对稳态或非稳态下的数据进行处理。关于非稳态工况永磁电机的故障诊断还可参考文献 [11, 13–21]。

4 永磁电机故障容错技术

采用永磁电机驱动时, 匝间故障是一种特殊问题。这是由于当故障发生后, 永磁体通常不会立刻停止旋转, 因而故障电流继续流动, 直至电机发生严重的热损坏。所以对永磁电机, 不仅要求有一种可靠的匝间故障检测方法, 而且要求有能维持驱动系统不中断运行的补救措施, 以期当出现定子匝间短路故障后, 电机仍能在不降低运行性能的情况下继续运行。对此, 只有基于冗余的方法才能解决该问题。

针对定子匝间短路故障, 文献 [23] 提出了一种简单的容错策略, 其无需任何硬件上的改进, 且不会造成驱动装置能力的完全丧失。一般情况下, 由定子匝间短路造成定子电压的不对称对整个定子电压只有很小的影响, 故障相电压的幅值几乎与同步旋转参考系的复定子电压矢量 $\tilde{V}_s^e$ 相同, 因而故障绕组的电流 i_f 由式 (5) 给定。该方程强调, 对给定的运行状态, 适当选择 d, q 电流组合, 能显著降低定子电压。相应地, 在维持给定的运行状态下, i_f 显著减小。

$$\left| \tilde{i}_f \right| \approx \frac{\left| \tilde{V}_s^e \right|}{\left| \frac{R_f}{\mu} + r_s + j\omega_c \left[L_{1s} + \mu (L_1 - 3\tilde{L}_2) \right] \right|} \quad (5)$$

式中: R_f ——绕组短路部分的电阻值; μ ——短路绕组的分数; L_{1s} ——漏感; L_1 ——绕组平均自感; L_2 ——自感的一次谐波幅值。

永磁电机驱动系统是高度非线性系统, 且对于系统参数变化及外来干扰相当敏感, 尤其当电机绕组断线或

相应的逆变器损坏时, 不平衡电流会引起转矩抖动, 导致电机无法平顺运转, 从而造成系统毁损。文献 [24] 对电动汽车永磁电机传动系统电压源逆变器的各种容错控制方法进行了综述, 认为相冗余的逆变器拓扑最适合电动汽车永磁电机传动系统容错控制。

多相电机已被建议在各种重要应用场合采用。这类电机由于相数较多, 能提供较高的冗余度以及较低的转矩波动。其最大的优点是在任何不平衡状态下有较高的容错能力, 即使出现一相或两相故障, 仍能继续运行。文献 [25] 在提出故障检测与运行策略后, 构建了系统动态模型进行分析和推导。在控制法则上, 提出通过智能互补的滑模控制 (complementary sliding mode control, CSMC) 并结合非对称归属函数之 TSK 型模糊神经网络 (TSK Fuzzy neural network-asymmetric membership function, TSKFNN-AMF) 方法对六相永磁电机传动系统实施容错控制, 以改善控制性能, 达到容错控制的稳定性要求。文献 [26] 基于 Park 变换, 采用矢量空间解耦建立电机的数学模型。针对五相永磁电机有高通容率率特性, 在电机发生单相开路故障后, 采用定子电流补偿法对其进行控制。仿真结果表明, 采用容错控制后, 电机平均转矩显著提高、转矩脉动大幅削减。

5 结语

电机监测及诊断技术在过去 20 年间有了很大进步, 从简单的电机保护装置到能监测运行状态、防止早期故障发生的先进装置。文中所述的技术可用来提高永磁电机运行的可靠性, 由此可减少非计划的停机时间, 提升电机的利用率, 其潜在经济效益是巨大的。

以往对电机状态监测的目标仅限于电机内部的电气和机械性能, 但如今已覆盖包括逆变器、负荷状态及传动系统中一些其他部件的监测。首个用于电机在稳态运行下状态监测的 MCSA 技术, 现在仍作为首选的方法在应用, 但已远远不能满足现实情况复杂系统的需求。基于故障状态的物理现象, 先进的数字信号处理和可靠的决策过程等新技术代表了近期的技术发展水平。当然, 更完善的故障识别和隔离技术、故障预诊断技术仍在继续探索中。对运用状态不敏感且在时变状态下的驱动系统的故障检测、故障程度评估及对驱动系统的容错控制等是近期研究的热点。电信号分析仍是目前电机状态检测主要使用方法。若结合模糊逻辑控制方法, 将可能提供一个更具综合处理能力的电机状态检测方案。将一些彼此相关技术融合到一种集合式方案中, 其优点是可覆盖的故障范围广, 能提高故障检测及诊断的准确性, 并有助于预诊断技术的开发。随着 AI 技术的发展, 在

国外,一种系统故障预诊断和健康管理技术(prognosis and health management, PHM)已在国防、核能等以安全为关键要素的领域得到应用^[27-28],相信不久的将来也能在国内强调安全的关键装备领域得到应用。

参考文献:

- [1] 刘振兴, 张哲, 尹项根. 异步电动机的状态监测与故障诊断技术综述[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2001(3): 285-289.
- LIU Z X, ZHANG Z, YING X G. A Summary of On-line Condition Monitoring and Fault Diagnostics for 3-phase Induction Motors[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2001(3): 285-289.
- [2] RIERA-GUASP M, ANTONINO-DAVIU J A, CAPOLINO G A. Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition Monitoring and Fault Detection: State of the Art[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1746-1759.
- [3] GRITLI Y. Diagnosis and Fault Detection in Electrical Machines and Drives based on Advanced Signal Processing Techniques[D]. Bologna: Universita di Bologna, 2014.
- [4] 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.
- [5] HENAO H, DEMIAN C, CAPOLINO G. A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1272-1279.
- [6] ALAMEH K, CITÉ N, HOBLOS G, et al. FAULT DETECTION AND ISOLATION APPROACH FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES[C]//ICSV22, Florence (Italy), 2015: 12-16.
- [7] SPECHT A, BOCKER J. Observer for the Rotor Temperature of IPMSM[C]//14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC, 2010.
- [8] WALLSCHEID O, HUBER T, PETERS W, et al. Real-Time Capable Methods to Determine the Magnet Temperature of Permanent Magnet Synchronous Motors—A Review[C]//Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2014: 811-818.
- [9] GLOWACZ A. Recognition of Acoustic Signals of Synchronous Motors with the Use of MoFS and Selected Classifiers[J]. Measurement Science Review, 2015, 15(4): 167-175.
- [10] MBO'O C P, HEROLD T, HAMEYER K. Impact of the load in the detection of bearing faults by using the stator current in PMSM's USB[C]//Proceedings 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- [11] ABBAS A H, AL-SAFFAR A A, SHARY D K. Bearings fault diagnosis in direct torque control permanent magnet synchronous motor based on discrete wavelet transform and artificial neural network[J]. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2014, 7(2): 341-351.
- [12] 陈致初, 符敏利, 彭俊. 永磁牵引电动机的失磁故障分析及预防措施[J]. 大功率变流技术 2010(3): 42-45, 55.
- CHEN Z C, FU M L, PENG J. Demagnetization Analysis and Preventive Measures of Permanent Magnet Traction Motor[J]. High Power Converter Technology, 2010(3): 42-45, 55.
- [13] AKAR M, EKER M. Demagnetization Fault Diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(2): 229-233.
- [14] YANG Y M, LI Y Q. Demagnetization fault diagnosis of permanent magnet in synchronous motor[J]. COMPUTER MODELLING & NEW TECHNOLOGIES, 2014, 18(12D):221-225.
- [15] HE J, ZHANG C F, MAO S A, et al. Demagnetization fault detection in permanent magnet synchronous motors based on sliding observer[J]. Journal of Nonlinear Science and Applications, 2016, 9(5): 2039-2048.
- [16] EBRAHIMI B M, FAIZ J, ROSHTKHARI M J. Static-, Dynamic-, and Mixed-Eccentricity Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4727-4739.
- [17] EBRAHIMI B M, ROSHTKHARI M J, FAIZ J, et al. Advanced Eccentricity Fault Recognition in Permanent Magnet Synchronous Motors Using Stator Current Signature Analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 2041-2052.
- [18] ROSERO GARCÍA J, Luis Romeral J, ROSERO GARCÍA E. Detecting eccentricity faults in a PMSM in non-stationary conditions[J]. INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN, 2012, 32(1): 5-10.
- [19] QUIROGA J, LIU L, CARTES D A. IEEE Fuzzy Logic based Fault Detection of PMSM Stator Winding Short under Load Fluctuation using Negative Sequence Analysis[C]//American Control Conference. Washington, 2008: 11-13.
- [20] TAGHIPOUR-GORJIKOLAIE M, RAZAVI S M I, SHAMSINEJAD M A. Intelligent Determining Amount of Inter-Turn Stator Winding Fault in Permanent Magnet Synchronous Motor Using an Artificial Neural Network Trained by Improved Gravitational Search Algorithm[J]. Journal of Advances in Computer Research, 2015, 6(1): 63-84.
- [21] HADEF M, DJERDIR A, IKHLEF N, et al. A Fault Severity Index for Stator Winding Faults Detection in Vector Controlled PM Synchronous Motor[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(5): 709-718.
- [22] CABLEA G, GRANJON P, B'ERENGUER C. Method of analysing non-stationary electrical signals[C]//4th International Conference on Condition Monitoring of Machinery in NonStationary Operations (CMMNO). Lyon, 2014.
- [23] LEE Y, HABETLER T G. A Stator Turn Fault Tolerant Strategy for Induction Motor Drives in Safety Critical Applications[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006: 1-7.
- [24] TASHAKOR A. Review on VSI Switch Fault Tolerant Control Systems for Electric Vehicle Drivetrains[J]. Engineering Letters, 2016, 24(2): 215-224.
- [25] LIN F J, HUNG Y C, TSAI M T. Fault tolerant control for six-phase PMSM drive system via intelligent complementary sliding mode control using TSKFNN-AMF[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5747-5762.
- [26] 袁登科, 胡宗杰, 王焜. 五相永磁同步电机矢量控制系统仿真分析[J]. 大功率变流技术, 2016(4): 18-22.
- YUAN D K, HU Z J, WANG K. Simulation and Analysis of Vector Control for Five-phase Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. High Power Converter Technology, 2016(4): 18-22.
- [27] LEE J, WU F J, ZHAO W Y, et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 42(1-2): 314-334.
- [28] Sebastian R K, Peripinayagam S, Jennions I K, et al. Prognostic Reasoner based Adaptive Power Management System for a More Electric Aircraft[C]//Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, Denver, 2016.