

基于新型探测线圈的永磁电机转子失磁故障在线监测方法

杜威, 孙宇光, 田代宗, 桂林

(清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:在永磁同步电机(PMSM)靠近定子侧的气隙中布置特殊节距及联接方式的新型探测线圈,转子局部失磁故障会在其端口引起特定频率的交流电压,理论上可作为转子失磁故障的判据。由于电机实际运行中转速的波动和采样频率的限制,采用传统信号处理方法难以准确提取探测线圈电压采样信号中的故障特征频率,可能会将转子失磁故障误判为定子内部短路故障。因此提出借助现代功率谱估计算法中的最小二乘旋转参数不变估计结合模拟退火算法,即使在转速扰动造成非整周期同步采样的情况下,也能够准确计算出探测线圈电压监测信号中各种分量的实际频率和有效值等,在此基础上提出了一种PMSM转子局部失磁故障的在线监测方案。通过样机实验,验证了这种在线监测方案的可靠性和灵敏性,为PMSM的安全运行提供了更完善的保障。

关键词:新型探测线圈;永磁同步电机;转子失磁故障;现代功率谱估计;故障在线监测

中图分类号:TM 313

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004001

0 引言

永磁同步电机中常见的转子失磁故障会造成损耗增大、振动加剧等现象,长期失磁运行会损伤电枢绕组甚至烧毁整个电机^[1]。现有文献通过检测绕组电流中的特定谐波分量($1/p$ 、 $2/p$ 次等分数次谐波分量, p 为极对数)来判断电机是否发生转子失磁故障^[2]。该方法具有信号采集简单、方便等优点^[3],但是存在一些局限性。

(1)永磁电动机通常采用变频器对其供电,但变频器输出并非理想正弦波,所以永磁电机即使运行在正常工况下,绕组电流也含有一些变频器引入的谐波成分,在检测中很难区分绕组电流谐波的产生原因,这给故障诊断带来了困难^[4]。

(2)某些电机由于绕组结构的原因,电枢电流中不会出现转子失磁的故障特征谐波^[4],所以无法通过定子电流来判断电机是否发生转子失磁故障。

(3)定子电流一般要通过电流互感器测取,由于互感器体积庞大、机体沉重,在某些场合(如电动汽车等领域)并不具备安装条件^[5];另外,对多相多分支电机,如果在每相每分支都安装电流互感器,成本将大幅增加。

因此,有必要寻求新的检测手段,既能对转子失磁故障进行可靠监测,又能降低检测成本。

文献[5]提出了一种特殊布置方法的新型探测线圈,理论上这种探测线圈在电机正常运行时端口

电压为0;当电机内部发生不对称故障后,探测线圈中会出现明显的交流电压信号,并且转子侧故障和定子侧故障在探测线圈中引起的谐波频率成分明显不同,可作为电机内部故障的判据,可根据其频率特征区分定子与转子内部故障。当然在实际运行过程中,由于电机本身的制造误差等因素,正常运行时电机内部会存在较小的谐波磁场,虽然不会影响电机正常运行,但是会在探测线圈中感应出幅值很小的固有电压。因此,利用探测线圈检测电机内部故障时,必须考虑探测线圈中实际存在的固有电压的影响。

检测到探测线圈的端口电压后,要想准确区分定子与转子内部故障,还需要准确提取其中的各种频率分量。传统的快速傅里叶变换(FFT)方法一般要求对信号进行整周期同步采样^[6],即采样频率 f_s 必须是信号频率 f 的整数倍,且满足采样定理,同时,采样信号的数据长度必须是其实际周期的整数倍,否则将会影响计算的准确性。而实际检测中,采样频率 f_s 一般是固定的,但电机运行过程中转速难免发生波动(尤其在突加负载或出现故障时),探测线圈端口电压的周期也会随之波动,此时很难对其进行整周期同步采样,所以FFT等传统信号处理方法很难准确提取探测线圈电压采样信号中的故障特征量。文献[7]将现代功率谱估计算法中的旋转不变信号参数估计技术(ESPRIT)与模拟退火(SA)算法相结合,能够准确提取笼型转子异步电动机发生转子断条故障后定子电流中出现的频率为 $(1 \pm 2s)f_s$ ^[8-9]的边频分量(其中, s 为转差率, f_s 为供电频率)。该方法能够克服信号采样时长的限制,所需采样点较

收稿日期:2019-05-17;修回日期:2020-02-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277103)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277103)

少,且不必整周期同步采样就能够得到准确的计算结果。

本文尝试将上述新型探测线圈应用到永磁同步电机转子失磁故障的在线监测中。与文献[5]所述的电励磁同步发电机励磁绕组匝间短路故障对气隙磁场的影响类似,(多对极)永磁电机发生转子局部失磁故障后,探测线圈端口会出现 $1/p$ 、 $2/p$ 次等分数次谐波电压,本文不再赘述其理论分析过程。为与引起探测线圈基波及奇数次谐波电压的定子绕组内部短路故障进行区分,本文借助现代功率谱估计算法中的总体最小二乘-旋转不变技术(TLS-ESPRIT),结合SA算法,从探测线圈端口电压采样信号中得到准确的转子局部失磁故障特征量,构成永磁电机转子失磁故障在线监测方案,并通过样机实验验证了该方案的可靠性和灵敏性。

1 永磁电机内部故障实验中探测线圈的反应

1.1 实验样机及安装在内部的新型探测线圈

本文定制了一台六相双分支永磁同步发电机样机,转子2对极、定子48槽,其主要参数如表1所示。在样机定子槽楔下面安装2个新型探测线圈(分别记为1号和2号探测线圈),2个线圈都是节距为1对极(即24槽距)的单个线圈,但空间位置不同,新型探测线圈原理及具体布置方法分别如附录中的图A1、图A2所示。

表1 实验样机的主要参数

Table 1 Main parameters of experimental prototype

参数	参数值	参数	参数值
直流输出额定功率/kW	4	额定频率/Hz	50
直流输出额定电压/V	40	极对数	2
额定转速/(r·min ⁻¹)	1500	相数	6
定子槽数	48	每相分支数	2

实验平台由六相永磁同步发电机样机及其同轴旋转的直流原动机、2个三相桥式整流器、层式结构负载电阻、数据采集系统等组成,如附录中的图A3所示。实验过程中,(直流)调速装置给直流原动机的电枢和励磁绕组供电,维持原动机与实验样机的转速保持不变,实验样机通过整流桥向电阻负载供电。通过实验样机上的外置接线面板,可以测得定子绕组的电压、电流以及2个探测线圈的端口电压,并可利用面板上连接绕组内部抽头的端子进行定子绕组内部短路故障实验。

1.2 定子绕组内部短路故障实验

本文使用的六相永磁实验样机,其定子绕组是由2套空间互差30°电角度、中性点不相连的三相对称绕组构成,分别记为A₁、B₁、C₁相绕组和A₂、B₂、C₂相绕组,其中每套绕组的每相绕组又包含2个并联

分支。本文在转速为1500 r/min、直流侧电阻负载工况下,进行了不同的相间短路和匝间短路故障实验,并测量了探测线圈端口电压。

图1为A₁相第1分支50%与A₂相第2分支75%之间发生金属性相间短路故障前、后探测线圈端口电压的实验波形(负载电阻 $R_{dc}=1.14\ \Omega$),短路故障发生在 $t=1.265\ \text{s}$ 时刻。图中, u_{d1} 、 u_{d2} 分别为1号、2号探测线圈的端口电压。

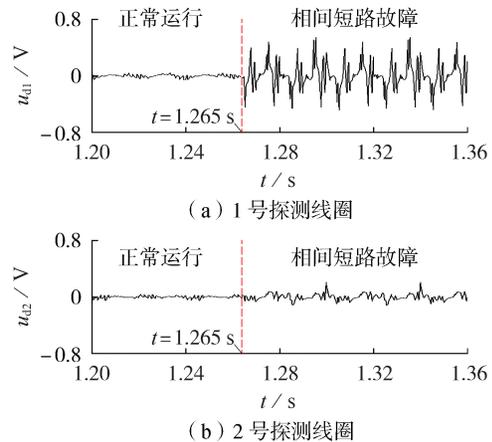


图1 定子绕组相间短路故障前、后的探测线圈端口电压实验波形

Fig.1 Experimental waveforms of open circuit voltage of search coil before and after stator winding phase-to-phase short circuit fault

由图1可以看出,实验样机正常运行时(对应 $t < 1.265\ \text{s}$ 的部分),2个探测线圈的端口电压几乎为0,这是由实验样机正常运行时气隙磁场的空间分布特点及探测线圈节距共同造成的^[4]。但是由于实验样机本身的制造误差等因素,2个探测线圈端口都存在幅值很小的固有电压信号。当实验样机发生定子内部相间短路故障后(对应 $t > 1.265\ \text{s}$ 的部分),1号探测线圈端口电压明显增大,容易看出是周期为0.02 s的交流电压,这是因为定子内部短路故障引起了分数次空间谐波的气隙磁场,其会在节距为1对极的探测线圈中产生感应电动势,而且探测线圈电动势的频率与故障附加谐波磁场的转速有关,为基频及其奇数倍;而2号探测线圈端口电压的增大不如1号探测线圈明显,这是因为探测线圈相对定子绕组静止,定子内部短路故障对不同位置探测线圈的影响不同^[5]。

图2是A₁相第1分支25%的金属性匝间短路故障前、后探测线圈端口电压的实验波形(负载 $R_{dc}=0.90\ \Omega$),短路故障发生在 $t=1.310\ \text{s}$ 时刻。

从图2中可以看出,虽然电机发生定子绕组匝间短路故障后探测线圈端口电压幅值变化不如发生相间短路故障时明显,但发生定子绕组匝间短路故障后探测线圈端口电压不会出现 $1/p$ 次等分数次交

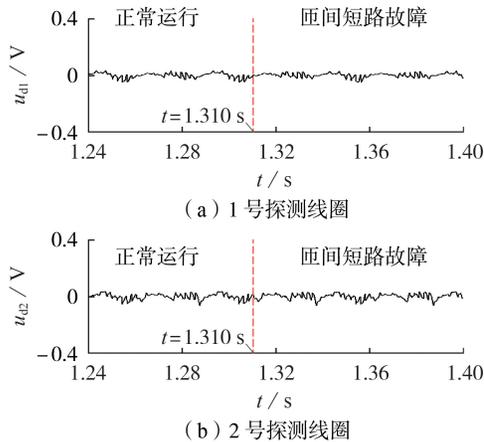


图2 定子绕组匝间短路故障前、后的探测线圈端口电压实验波形

Fig.2 Experimental waveforms of open circuit voltage of search coil before and after stator winding turn-to-turn short circuit fault

流成分,周期仍然为0.02 s,其原因和定子绕组相间短路故障类似。

从实验样机的定子绕组匝间短路和相间短路故障实验结果可以得出,只要电机发生了电枢绕组内部故障,对外表现的故障特征就是探测线圈端口电压中出现基波及奇数次谐波分量,而不会出现 $1/p$ 次等分数次谐波分量。

1.3 转子局部失磁故障实验

本文所用实验样机的永磁转子共4极,其中一极沿轴向分成长度相等、可拆卸的5段磁极单元,装配为正常转子,如附录中的图A4所示;另外制作了5个无磁性且形状、质量完全相同的替换单元,用来代替图A4中的某一块或多块磁极单元,即可装配为局部失磁的转子,模拟转子失磁5%、10%、15%、20%及25%的情况进行实验测量。本文给出转子失磁5%和失磁15%这2种故障的实验结果。

设置直流侧负载电阻 $R_{dc}=1.14\ \Omega$ 、转速基本保持在1500 r/min(与图1中相同)。图3为实验样机转子失磁5%故障下,2个探测线圈端口电压的实验波形。

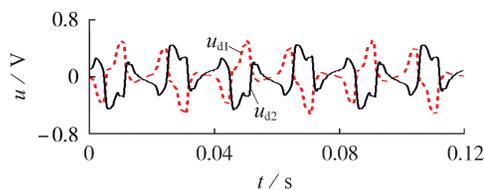


图3 转子失磁5%故障工况下探测线圈端口电压实验波形
Fig.3 Experimental waveforms of open circuit voltage of search coils under demagnetization 5% fault condition

从图3可以看出,当实验样机出现转子5%失磁故障后,2个探测线圈中均出现了周期为0.04 s的交流电压,这是由于转子失磁故障引起了分数次空间

谐波的气隙磁场,并随转子以同步速相对探测线圈转动,所以会在探测线圈中感应出对应分数次空间谐波磁场的分数次谐波电动势,而且与图1中正常运行部分($t < 1.265\text{ s}$)相比,探测线圈端口电压的幅值明显增加,这说明利用该交流电压信号能够判断电机出现了局部失磁故障。

转子15%失磁故障是通过将1个极上的3块永磁单元替换为无磁单元进行模拟的,由于这种较严重的失磁故障在实验样机定子相绕组的两分支之间会引起较大的不平衡电流,造成绕组内部电流较大、发热激增,为了避免对样机的损伤,仅进行了低速工况的实验,将转速维持在300 r/min,并设置负载 $R_{dc}=1.14\ \Omega$,得到的探测线圈电压实验波形如图4所示。

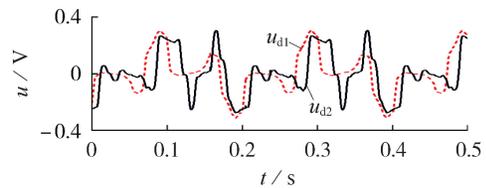


图4 转子失磁15%故障工况下探测线圈端口电压实验波形

Fig.4 Experimental waveforms of open circuit voltage of search coils under demagnetization 15% fault condition

转速300 r/min对应的电枢电压电流基频为10 Hz,从图4可以看出失磁15%故障在探测线圈中引起周期为0.2 s的感应电压,该电压也为 $1/p$ 等分数次谐波电压。

从失磁5%和失磁15%故障的实验结果可以看到,当电机发生不对称的局部失磁故障时,无论转子失磁比例为多少,在探测线圈端口都会感应出 $1/p$ 等分数次谐波电压。

对比2种故障的实验结果可以看出,定子侧故障和转子侧故障会在探测线圈中产生不同频率的电压信号,所以可根据探测线圈端口电压的频率来判断故障的类型。

2 转子局部失磁故障在线监测方案

利用探测线圈端口电压采样信号来监测转子局部失磁故障的一个关键问题是必须准确提取信号中的各种频率分量,然后才能利用其中(区别于定子内部短路等其他故障)的转子失磁故障特征量,构造可靠、灵敏的故障监测判据。

2.1 应用TLS-ESPRIT+SA算法提取采样信号的各种频率分量

现代谱估计技术对信号频率具有很高的分辨率,处理数据长度较小的采样信号时也能得到相当准确的计算结果,其中TLS-ESPRIT算法在笼型异步

电动机转子断条故障检测中已得到了广泛应用^[7,10-12];而在已知周期性信号中主要分量频率值的情况下,SA算法能够准确计算出各种频率分量的幅值^[13]。TLS-ESPRIT+SA算法首先利用旋转不变技术对采样得到的原始数据进行2次特征值分解,可求得探测线圈电压的主要交流分量的频率总体最小二乘解以及幅值粗略估计值;然后将上述结果代入SA算法,利用Metropolis准则在解的全局空间进行搜索,从而得到主要交流分量的幅值全局最优解。本文对探测线圈电压的采样频率为2 000 Hz,窗口长度取为0.5 s。TLS-ESPRIT和SA算法的具体计算步骤可参见文献^[14-15],本文不再赘述。

为了验证 TLS-ESPRIT+SA 算法的准确性,构造理想周期信号如下:

$$u_1 = A_1 \cos(2\pi f_1 + \varphi_1) + A_2 \cos(2\pi f_2 + \varphi_2) + A_3 \cos(2\pi f_3 + \varphi_3) + A_4 \cos(2\pi f_4 + \varphi_4) + A_5 \cos(2\pi f_5 + \varphi_5) + A_6 \cos(2\pi f_6 + \varphi_6) + A_7 \cos(2\pi f_7 + \varphi_7) + A_8 \cos(2\pi f_8 + \varphi_8) \quad (1)$$

令 $f_1 = 10.04 \text{ Hz}$ 、 $f_2 = 20.08 \text{ Hz}$ 、 $f_3 = 30.12 \text{ Hz}$ 、 $f_4 = 40.16 \text{ Hz}$ 、 $f_5 = 60.24 \text{ Hz}$ 、 $f_6 = 70.28 \text{ Hz}$ 、 $f_7 = 80.32 \text{ Hz}$ 、

$f_8 = 90.36 \text{ Hz}$ 、 $A_1 = 0.3 \text{ V}$ 、 $A_2 = 0.5 \text{ V}$ 、 $A_3 = 0.2 \text{ V}$ 、 $A_4 = 0.7 \text{ V}$ 、 $A_5 = 0.8 \text{ V}$ 、 $A_6 = 0.6 \text{ V}$ 、 $A_7 = 0.5 \text{ V}$ 、 $A_8 = 0.3 \text{ V}$ 、 $\varphi_1 = 90^\circ$ 、 $\varphi_2 = 30^\circ$ 、 $\varphi_3 = 60^\circ$ 、 $\varphi_4 = 45^\circ$ 、 $\varphi_5 = 36^\circ$ 、 $\varphi_6 = 30^\circ$ 、 $\varphi_7 = 45^\circ$ 、 $\varphi_8 = 60^\circ$,采样频率为5 kHz,以此模拟一个5对极永磁同步电机运行在工频 $f = 50 \text{ Hz}$ 的工况下,发生转子局部失磁故障后转速上升0.4%的情况。分别应用 TLS-ESPRIT+SA 算法和 FFT 方法对式(1)所示的理想信号进行处理,数据长度分别选择为0.2 s和0.16 s,计算结果如表2和表3所示,其中表3仅给出了幅值超过0.02 V的频率分量。

由表2可以看出,无论信号数据长度选择为0.2 s还是0.16 s,TLS-ESPRIT+SA算法都能够准确计算出各种交流分量的频率、幅值和相角。

由表3可以看出,利用FFT方法处理数据长度为0.2 s的采样信号(包含2.008个周期)时,计算出的频率和幅值误差比 TLS-ESPRIT+SA 算法要大得多,并且还出现了实际不存在的虚假频率分量(如50、55 Hz等);而对于数据长度为0.16 s的采样信号(包含1.606个周期),FFT方法的频率和幅值计算误差更大,在真实频率点附近计算出了2个幅值较大

表2 TLS-ESPRIT+SA算法计算理想信号的结果

Table 2 Calculative results of ideal signal by TLS-ESPRIT+SA algorithm

数据长度 / s	计算结果			数据长度 / s	计算结果		
	频率 / Hz	幅值 / V	相角 / (°)		频率 / Hz	幅值 / V	相角 / (°)
0.2	10.04	0.300	89.99	0.16	10.04	0.300	90.11
	20.08	0.501	29.94		20.08	0.500	30.06
	30.12	0.201	60.03		30.12	0.200	59.79
	40.16	0.700	44.99		40.16	0.700	44.99
	60.24	0.800	35.97		60.24	0.800	35.98
	70.28	0.601	29.93		70.28	0.599	30.03
	80.32	0.501	44.96		80.32	0.499	44.91
	90.36	0.300	60.03		90.36	0.300	59.87

表3 FFT方法计算理想信号的结果

Table 3 Calculative results of ideal signal by FFT algorithm

数据长度 / s	计算结果			数据长度 / s	计算结果		
	频率 / Hz	幅值 / V	相角 / (°)		频率 / Hz	幅值 / V	相角 / (°)
0.2	5	0.020	11.15	0.16	6.25	0.250	-178.79
	10	0.305	87.46		12.50	0.207	54.18
	15	0.026	14.52		18.75	0.496	78.77
	20	0.520	32.30		25.00	0.188	-165.04
	30	0.218	60.75		31.25	0.184	89.33
	35	0.032	32.26		37.50	0.557	127.07
	40	0.714	50.00		43.75	0.306	-71.32
	50	0.022	24.05		50.00	0.091	-149.68
	55	0.047	36.50		56.25	0.327	156.85
	60	0.816	44.22		62.50	0.635	-27.09
	70	0.592	39.89		68.75	0.448	56.01
	80	0.475	57.02		75.00	0.290	-103.11
	85	0.038	-130.93		81.25	0.451	3.50
	90	0.263	74.79		87.50	0.072	161.88
	95	0.050	-113.41		93.75	0.281	-44.80
	100	0.033	-113.69		100.00	0.152	-51.24
105	0.026	-113.00	106.25	0.117	-54.88		
110	0.022	-112.06	112.50	0.098	-57.37		

的频率分量(如真实幅值为0.5 V的80.32 Hz分量,计算结果却出现了幅值为0.29 V的75 Hz分量和幅值为0.451 V的81.25 Hz分量)。

从表3中的计算结果可以发现,FFT方法不适合处理包含约半个周期的采样信号。将表2与表3中数据长度为0.16 s的计算结果进行重构,并与原信号进行对比,结果如图5所示,图5更直观地显示了TLS-ESPRIT+SA算法在计算非整周期同步采样信号方面的优势。

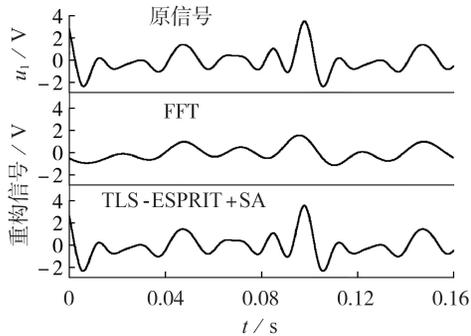


图5 基于TLS-ESPRIT+SA算法和FFT方法计算结果的重构信号与原信号的对比

Fig.5 Comparison between original signal and reconstructed signals respectively based on TLS-ESPRIT+SA algorithm and FFT algorithm

另一方面,从表3可以看出,在2种非整周期同步采样的情况下,FFT方法的计算结果中都出现了频率为50 Hz的虚假频率分量,理论上这是定子内部短路故障在探测线圈中引起的特征电压,所以利用FFT方法处理采样信号时可能会将转子失磁故障误判为定子侧故障。

通过上述分析发现,TLS-ESPRIT+SA算法较传统FFT方法有很明显的优势,尤其对数据长度不大或者非整周期同步采样的信号,都能准确计算出采样信号中主要交流分量的频率、幅值(有效值)及相角。

2.2 转子局部失磁故障在线监测方案

本文利用横河DL850E数字示波器,以10 kHz采样频率采集了实验样机在不同工况(正常运行、定子绕组内部短路故障和转子局部失磁5%故障)下2

个探测线圈的端口电压信号,并利用TLS-ESPRIT+SA算法计算得到主要交流分量的频率、有效值以及相角,结果如附录中的表A1所示。对1号探测线圈电压采样信号的计算结果进行重构,并与原信号进行对比,结果如附录中的图A5所示。

从图A5中可以看出,对3种工况下的采样信号进行谱估计计算得到的重构信号,与原信号都几乎完全相同,者说明利用TLS-ESPRIT+SA算法处理实验数据能够得到准确的计算结果。

从表A1中可以看出,实验样机出现转子失磁5%故障后,2个探测线圈中的1/2次、3/2次和5/2次等分数次谐波的幅值明显增加,这符合理论分析的结果。因此,可以利用探测线圈中分数次谐波作为故障特征分量,构造实验样机转子局部失磁故障的在线监测判据,则在线监测值可由式(2)计算得到。

$$U_{op} = \sqrt{U_{1/2}^2 + U_{3/2}^2 + \dots + U_{k/2}^2} \quad k = 1, 3, 5, \dots \quad (2)$$

其中, $U_{1/2}$ 、 $U_{3/2}$ 和 $U_{k/2}$ 分别为探测线圈端口电压中1/2次、3/2次和 $k/2$ 次谐波分量的有效值。

从表A1中还可以看出,实验样机实际正常运行时,探测线圈端电压中也存在幅值很小的1/2次、3/2次和5/2次等分数次固有谐波分量,在监测方案中需要设置一个合理的报警值^[16],从而避免监测装置在电机正常运行等情况下因为这些固有电压而误报警。报警值可由式(3)计算得到。

$$U_{alarm} = \frac{n}{n_N} K_{tol} U_{op,normal} \quad (3)$$

其中, n 为电机实际运行转速; n_N 为额定转速; K_{tol} 为可靠系数,一般取 $1.2 \leq K_{tol} \leq 3$,本文取 $K_{tol} = 3$; $U_{op,normal}$ 为电机以额定转速正常运行时的在线监测值,即 $U_{op,normal} = \sqrt{U_{1/2,normal}^2 + U_{3/2,normal}^2 + \dots + U_{k/2,normal}^2}$, $U_{1/2,normal}$ 、 $U_{3/2,normal}$ 和 $U_{k/2,normal}$ 分别为实验样机在额定转速下正常运行时,探测线圈端口电压中的1/2次、3/2次和 $k/2$ 次谐波分量的有效值。当在线监测值 $U_{op} > U_{alarm}$ 时,可判断电机转子出现局部失磁故障。

对式(2)构成的监测判据中选择不同的故障特征量(即选择不同 k 值)时,根据式(3)计算得到相应的报警值 U_{alarm} 也不同,可以分别计算出相应的监测灵敏度 $S = U_{op}/U_{alarm}$ 。表4给出了实验样机运行在额

表4 额定转速下发生转子失磁5%故障时,不同 k 值对应的 U_{alarm} 、 U_{op} 、 S

Table 4 Values of U_{alarm} , U_{op} and S during demagnetization 5% fault for different values of k at rated speed

k	1号探测线圈监测方案			k	2号探测线圈监测方案		
	U_{alarm}/V	U_{op}/V	S		U_{alarm}/V	U_{op}/V	S
1	0.008 7	0.090 3	10.38	1	0.008 2	0.086 3	10.51
3	0.023 8	0.201 2	8.47	3	0.023 1	0.189 9	8.23
5	0.024 0	0.214 5	8.94	5	0.023 6	0.202 7	8.59
7	0.025 1	0.217 3	8.65	7	0.025 2	0.207 8	8.24
9	0.025 4	0.222 4	8.76	9	0.025 6	0.214 3	8.38
11	0.025 9	0.223 3	8.62	11	0.026 5	0.215 4	8.12
取所有分数次谐波	0.035 7	0.225 1	6.31	取所有分数次谐波	0.038 1	0.217 7	5.71

定转速时,不同 k 取值下的监测方案报警值以及转子失磁5%故障下的在线监测值和灵敏度。

从表4中可以看出,当 $k=1$ 时,2个探测线圈监测判据的灵敏度最大,这是因为只取1/2次谐波作为监测值时,相应的报警值也很小,所以灵敏度最大。但是如果只选择1/2次谐波作为监测值,实验样机运行在额定转速1500 r/min时的报警值过小,只有0.0087 V,在电机实际运行时监测装置存在误动的可能性。从表4中还可以看出,随着 k 值的增大,灵敏度越来越小,这是因为选择的分数次谐波分量越多,相应的报警值也会越大,使得监测判据的灵敏度下降。综合考虑,为保证监测判据的可靠性和灵敏性,选择 $k=5$,即在线监测值如式(4)所示。

$$U_{op} = \sqrt{U_{1/2}^2 + U_{3/2}^2 + U_{5/2}^2} \quad (4)$$

此时由式(3)可以计算得到实验样机在额定转速下运行时,1号探测线圈监测方案对应的报警值 $U_{alarm} = 0.024$ V,2号探测线圈监测方案对应的报警值 $U_{alarm} = 0.0236$ V。

在实验样机运行转速为1500 r/min和600 r/min这2种工况下,分别对实验样机正常运行、定子绕组内部短路故障和转子局部失磁5%故障这3种工况进行实验。由式(3)可以计算得到实验样机运行转速为600 r/min时,1号探测线圈监测方案对应的报警值 $U_{alarm} = 0.0096$ V,2号探测线圈监测方案对应的报警值 $U_{alarm} = 0.0095$ V。将不同情况下探测线圈中的1/2、3/2和5/2次谐波分量分别代入式(4)中,得到在线监测值,并计算出转子失磁5%故障下的监测灵敏度,结果如表5所示。表中,工况1、2、3分别对应实验样机正常运行、定子绕组内部短路故障和转子局部失磁5%故障。

表5 发生转子失磁5%故障时,根据式(4)得到的 S
Table 5 Values of S during demagnetization 5% fault, obtained according to monitoring scheme based on Formula (4)

电机转速 / (r·min ⁻¹)	探测 线圈	U_{alarm} / V	U_{op} / V			S
			工况1	工况2	工况3	
1500	1号	0.0240	0.0080	0.0118	0.2145	8.94
	2号	0.0236	0.0079	0.0099	0.2027	8.59
600	1号	0.0096	0.0040	0.0041	0.0997	10.39
	2号	0.0095	0.0032	0.0029	0.0769	8.09

由表5可知,无论实验样机运行在额定转速还是低速,设定的报警值都大于实验样机正常运行或出现定子绕组内部短路故障时的在线监测值的2倍,所以电机在正常运行或出现定子绕组内部短路故障工况下,转子局部失磁故障的监测判据不会误报警。当实验样机发生转子局部失磁5%故障时,该故障监测判据的监测灵敏度都高于8,具有很高的灵敏性,能够准确判断电机出现转子局部失磁故障。

3 结论

本文首先利用TLS-ESPRIT计算出采样信号中主要交流分量的频率,再利用SA算法计算各频率分量的幅值和相角。该方法降低了对所监测信号的采样率及数据长度要求,克服了传统FFT方法计算非整周期同步采样信号的局限性,为基于探测线圈特定谐波电压的转子失磁故障在线监测值提供了保障。

在准确提取出探测线圈端口电压各种频率分量的基础上,针对一台特制的六相永磁同步发电机样机,提出了一种永磁同步电机转子局部失磁故障的在线监测方案。实验结果表明,无论实验样机运行在额定转速还是低速,当电机正常运行或出现定子绕组内部短路故障时,该监测方案都不会误报警,保证了监测方案的可靠性;当电机转子出现局部失磁5%故障时,该监测方案的灵敏度很高,能够准确地判断出电机发生了转子失磁故障。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 魏海增,马宏忠,陈诚,等. 基于CWT-HHT结合的永磁同步电机失磁故障诊断方法及其可行性分析[J]. 电机与控制应用, 2017,44(8):81-87.
WEI Haizeng, MA Hongzhong, CHEN Cheng, et al. Diagnosis method based on CWT-HHT of demagnetization fault for permanent magnet synchronous motor and analyzing its feasibility [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(8): 81-87.
- [2] ROSERO J, GARCIA A, CUSIDO J, et al. Fault detection by means of Hilbert Huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization[C]//2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing. Alcalá de Henares, Spain: IEEE, 2007: 1-6.
- [3] CRITLI Y. Diagnosis and fault detection in electrical machines and drives based on advanced signal processing techniques[D]. Bologna, Italy: Università di Bologna, 2014.
- [4] FAIZ J, NEJADIKOTI H. Demagnetization fault indexes in permanent magnet synchronous motors—an overview[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(4): 1-11.
- [5] 孙宇光,余锡文,魏锟,等. 发电机绕组匝间故障检测的新型探测线圈[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 917-924.
SUN Yuguang, YU Xiwen, WEI Kun, et al. A new type of search coil for detecting inter-turn faults in synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 917-924.
- [6] 胡广书. 数字信号处理:理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 2012: 144-149.
- [7] 许伯强,孙丽玲,李和明. 基于高频率分辨率谱估计技术与优化算法的异步电动机转子故障检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 140-147.
XU Boqiang, SUN Liling, LI Heming. A detection method for rotor fault in induction motors based on high frequency resolution spectrum estimation technique and optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 140-147.
- [8] 马宏忠,胡庚生,黄允凯,等. 感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 107-112.
MA Hongzhong, HU Qiansheng, HUANG Yunkai, et al. Simulating and experiment studying on rotor winding fault of induc-

- tion motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4):107-112.
- [9] 许伯强, 孙丽玲. 基于MIRPSA的感应电动机转子断条数目诊断判断[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3):132-136.
XU Boqiang, SUN Liling. A MIRPSA-based criterion to quantify broken rotor bars in induction motors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3):132-136.
- [10] 许伯强, 王志远. 基于Duffing系统和扩展Prony算法的异步电动机转子断条故障检测[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9):187-191, 197.
Boqiang, WANG Zhiyuan. Detection of broken rotor bar fault of asynchronous motor based on Duffing system and extended Prony algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):187-191, 197.
- [11] 许伯强, 田士华. Park矢量模平方函数与ESPRIT相结合的异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 高压电器, 2016, 52(11):107-112, 118.
XU Boqiang, TIAN Shihua. New detection method for broken rotor bar fault in asynchronous motor based on Park's vector modulus and ESPRIT[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11):107-112, 118.
- [12] 许伯强, 白旭. 基于SVD与ESPRIT的异步电动机转子断条故障检测新方法[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(1):42-47, 59.
XU Boqiang, BAI Xu. New detection method of broken rotor bar fault in induction motors based on singular value decomposition and estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(1):42-47, 59.
- [13] 孙丽玲, 许伯强, 李志远. 基于MUSIC与SAA的笼型异步电动机转子断条故障检测[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12):205-212.
SUN Liling, XU Boqiang, LI Zhiyuan. A MUSIC-SAA-based detection method for broken rotor bar fault in induction motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12):205-212.
- [14] 王永良. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:185-197.
- [15] 包子阳, 余继周, 杨杉. 智能优化算法及其MATLAB实例[M]. 北京:电子工业出版社, 2018:130-143.
- [16] 孙宇光, 王炳辉, 徐伟, 等. 发电电动机励磁绕组匝间短路故障在线监测[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3):211-217.
SUN Yuguang, WANG Binghui, XU Wei, et al. Online monitoring of excitation winding inter-turn short circuit of generator/motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):211-217.

作者简介:



杜威

杜威(1995—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为基于探测线圈的多相无刷励磁机故障诊断(E-mail: 396694659@qq.com);

孙宇光(1975—),女,江苏泰兴人,副教授,博士,主要研究方向为电机故障分析与检测保护;

田代宗(1990—),男,湖北恩施人,硕士研究生,主要研究方向为多相永磁电机系统内部故障分析;

桂林(1974—),男,安徽广德人,副教授,博士,主要研究方向为大型机组保护及故障分析。

(编辑 任思思)

Online monitoring method for rotor demagnetization fault of permanent magnet synchronous machine based on new type of search coil

DU Wei, SUN Yuguang, TIAN Daizong, GUI Lin

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A new type of search coil with special pitch and connection mode is arranged in the air gap near the stator side of the PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine), which will cause a specific frequency of AC voltage after rotor local demagnetization fault. In theory, it can be used as a criterion for demagnetization fault of the rotor. Due to the fluctuation of the speed and limit of the sampling rate during the actual operation of the PMSM, it is difficult to accurately extract the fault characteristic frequency in the sampling signal of the open circuit voltage of the search coil by the traditional signal processing method, and the demagnetization fault may be misjudged as the stator internal short circuit fault. Therefore, it is proposed to use the TLS-ESPRIT (Total Least Squares-Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique) combined with the SA (Simulated Annealing) algorithm, which can accurately calculate the actual frequencies and RMS (Root-Mean-Square) of various components in the monitoring signal of the open-circuit voltage of the search coil, even when the speed disturbance causes non-integral periodic synchronous sampling. On this basis, an online monitoring scheme for local demagnetization fault of PMSM is proposed. The reliability and sensitivity of the online monitoring scheme are verified by prototype experiments, which provides more guarantee for the operation safety of PMSM.

Key words: new type of search coil; permanent magnet synchronous machine; rotor demagnetization fault; modern power spectrum estimation; fault online monitoring

附录

实验样机上安装的 2 个新型探测线圈都是节距为 1 对极的线圈，其原理图如图 A1 所示，图中， τ 为极距。1 号和 2 号探测线圈在实验样机中的布置如图 A2 所示。

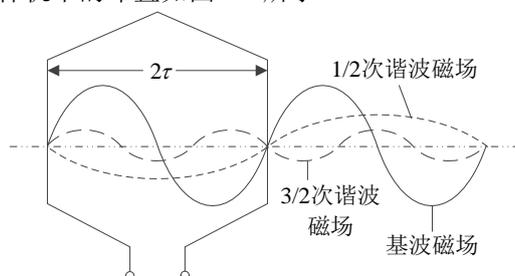


图 A1 探测线圈的原理 ($P=2$)

Fig.A1 Principle of detection coils ($P=2$)

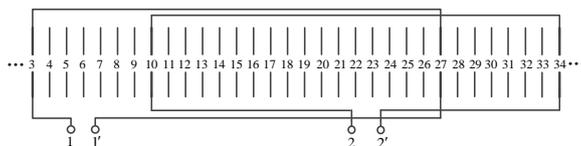


图 A2 探测线圈在样机中的布置位置

Fig.A2 Position of detection coils in experimental prototype

从图 A1 中可以看出，基波磁场在探测线圈中恰好分布 1 个空间周期，产生的总磁链为 0，而电机正常运行时的气隙磁场以基波为主（还有少量的奇数次谐波磁场），所以探测线圈中不会感应出电动势，理论上端口电压为 0。当电机发生不对称故障时，会在气隙中产生分数次和偶数次谐波故障附加磁场，其中分数次谐波磁场（比如 1/2 次、3/2 次）在 2 个探测线圈中感应出交流电动势。



图 A3 六相永磁同步发电机样机实验平台

Fig.A3 Six-phase permanent magnet synchronous generator prototype experimental platform



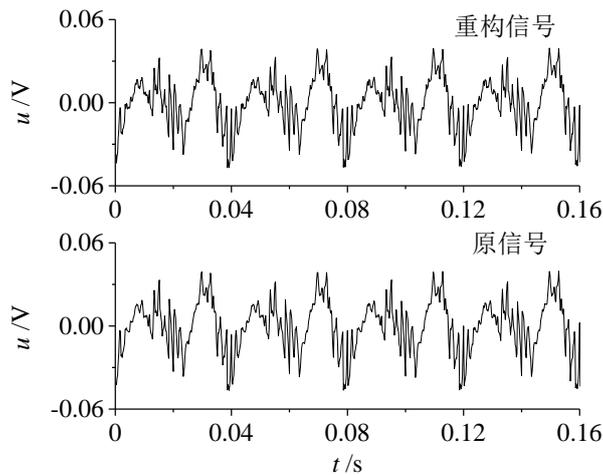
图 A4 实验样机转子结构示意图（正常转子的装配图）

Fig.A4 Experimental prototype rotor structure (Assembly diagram of normal rotor)

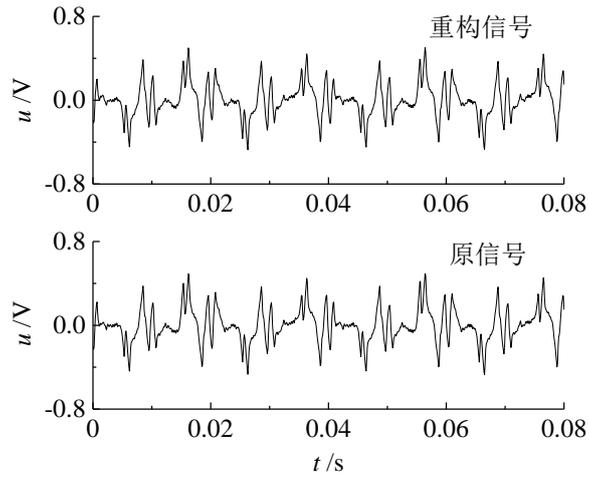
表 A1 采用 TLS-ESPRIT+SA 算法得到的探测线圈端口电压主要交流分量的频率、有效值及相角

Table A1 Calculates frequency, effective value and phase angle of main AC component of open-circuit voltage of search coil, calculated by TLS-ESPRIT+SA algorithm

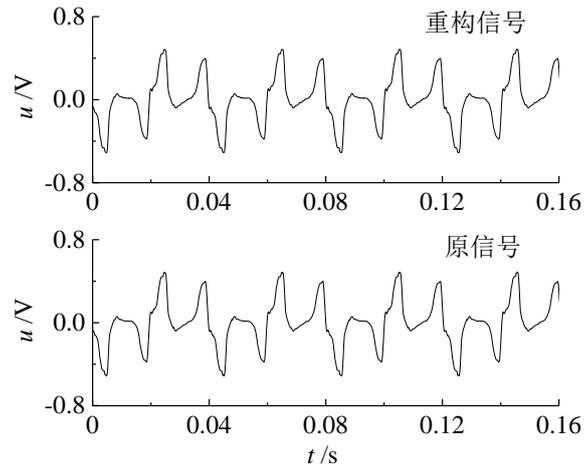
工况	计算结果				
	频率/Hz	1号探测线圈的		2号探测线圈的	
		有效值/V	相角/(°)	有效值/V	相角/(°)
正常	25.06 (1/2 次)	0.003	20.02	0.003	45.12
	50.01 (基波)	0.013	167.75	0.003	110.61
	75.05 (3/2 次)	0.007	48.18	0.007	64.07
	124.67 (5/2 次)	0.001	85.79	0.002	2.57
	150.16 (3 次)	0.003	105.98	—	—
	174.84 (7/2 次)	0.003	32.82	0.003	37.77
	224.88 (9/2 次)	0.001	35.08	0.001	64.78
	249.73 (5 次)	0.001	28.09	0.002	1.01
转子局部失磁 5%故障	24.82 (1/2 次)	0.090	103.63	0.086	99.80
	49.64 (基波)	0.011	54.42	0.003	35.85
	74.45 (3/2 次)	0.180	60.56	0.169	133.15
	124.07 (5/2 次)	0.074	18.73	0.071	11.15
	148.84 (3 次)	0.002	97.43	—	—
	173.70 (7/2 次)	0.035	12.40	0.046	33.72
	223.33 (9/2 次)	0.047	51.10	0.052	2.10
	248.17 (5 次)	0.001	17.90	0.002	21.97
定子相间短路故障	24.94 (1/2 次)	0.004	11.31	0.001	61.54
	49.77 (基波)	0.057	56.02	0.026	36.22
	74.76 (3/2 次)	0.011	70.57	0.006	58.09
	124.47 (5/2 次)	0.004	89.20	0.008	89.20
	149.30 (3 次)	0.080	114.56	0.012	55.13
	174.25 (7/2 次)	0.010	49.66	0.010	37.37
	224.09 (9/2 次)	0.010	116.07	0.004	12.63
	248.89 (5 次)	0.070	54.22	0.013	2.67



(a) 正常运行



(b) 定子绕组内部短路故障



(c) 转子局部失磁 5%故障

图 A5 基于 TLS-ESPRIT+SA 算法计算结果的重构信号与原始信号的对比

Fig.A5 Comparison between original signal and reconstructed signal respectively based on TLS-ESPRIT+SA algorithm