

基于高频信号注入的永磁同步电机 局部退磁故障诊断研究

徐政¹, 张建忠^{2*}, 姜永将³, 邓富金²

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏省南京市 211167; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096; 3. 南京邮电大学自动化学院/人工智能学院, 江苏省南京市 210023)

Detection of Local Demagnetization in Permanent Magnet Synchronous Machine Based on High Frequency Signal Injection

XU Zheng¹, ZHANG Jianzhong^{2*}, JIANG Yongjiang³, DENG Fujin²

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu Province, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China; 3. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The local demagnetization fault in permanent magnet synchronous motors (PMSMs) can cause abnormal vibrations and noise to machine, and even potentially leading to permanent damage. Thus, accurate detection of local demagnetization fault is of paramount importance. It is found that local demagnetization fault can induce local saturation in the stator iron core, subsequently leading to an increase in the inductance saliency. While this phenomenon is evidently absent in a uniformly demagnetized state. Based on this, this paper proposes a targeted detection approach for local demagnetization fault by extracting the high frequency (HF) fault features from the zero-sequence voltage of the motor under HF signal injection. An experimental platform is established to validate the method's effectiveness.

KEY WORDS: permanent magnet synchronous machine (PMSM); high frequency signal injection; zero-sequence voltage; local demagnetization fault

摘要: 永磁同步电机的局部退磁故障会引起异常振动和噪声, 甚至可能导致电机出现永久性的损坏, 准确地诊断局部退磁故障具有重要意义。该文研究发现局部退磁故障会引起定子铁芯的局部饱和, 并进一步导致永磁同步电机的电感凸极性增加, 而该现象并不会在均匀退磁状态下出现。基于此, 提出基于电机在高频信号注入下零序电压中的高频故障特征, 有针对性地诊断局部退磁故障, 并搭建实验平台, 验证

所提方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 高频信号注入; 零序电压; 局部退磁故障

0 引言

近年来, 永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因其高转矩密度、高效率以及控制特性好等优点在诸如电动汽车、风力发电、航空航天等领域得到了广泛的应用^[1-2]。然而, 在这些应用场合永磁同步电机大多运行在恶劣的工作环境下, 受到高温升、强电枢去磁磁场、化学腐蚀和物理冲击等作用, 电机转子上的永磁体容易出现退磁故障。永磁体的退磁故障会直接导致电机空载反电势下降, 此时为了维持电机的电磁转矩输出, 通常需要增大定子电流, 这会带来进一步的损耗和温升, 并加剧转子永磁体的退磁^[3-4]。

永磁同步电机的退磁故障可分为均匀退磁故障和局部退磁故障, 前者多由电机运行时温升异常或材料老化引起, 在均匀退磁前后永磁同步电机的三相参数仍保持对称, 在设计保留有一定裕度的情况下, 不会对电机的运行带来恶劣影响。而局部退磁故障会使电机气隙磁密分布发生畸变, 可能会引起电机的异常振动和噪声^[5-6], 严重时电机会过载并导致电机的永久性损坏。因此, 准确诊断局部退磁故障对提高永磁同步电机的运行可靠性非常关键^[7-9]。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0196300); 南京工程学院开放基金项目(XTCX202308)。

National Key R&D Program (2022YFE0196300); Open Research Fund of Nanjing Institute of Technology (XTCX202308).

目前,国内外学者对永磁同步电机的退磁故障诊断多从定子电流、磁链、径向磁感应强度、单槽反电势、转矩等信号中提取故障特征。文献[10]指出局部退磁故障会在定子电流或转矩中引起一定的间谐波分量,并有针对性地提出了基于电流或转矩间谐波分量的诊断方法,然而这类特征容易受到电机机械、电流闭环控制的影响。文献[11]基于相电流幅值的变化特征进行局部退磁和匝间短路故障的区分,然而该现象也仅在电流闭环控制器设计带宽较小时较为明显。基于观测器辨识磁链或反电势^[12-13]进行退磁诊断的方法较多,但观测器的辨识结果依赖准确的电机参数。此外,电机的磁链与反电势参数均为集总参数,局部退磁故障和均匀退磁故障可能会造成相同的磁链或反电势下降,因此这类方法无法区分均匀退磁和局部退磁故障。文献[14]详细分析了表贴式永磁同步电机局部退磁和均匀退磁故障的机理,研究发现绕组线圈串联连接的永磁同步电机并不会因为局部退磁故障在反电势中产生间谐波分量,自然也不会产生定子电流间谐波分量;该文献还提出基于零序电压进行退磁故障诊断方法,但该方法与传统基于磁链、反电势的方法并无本质区别,且同样无法进行局部退磁和均匀退磁故障的区分。文献[15]利用径向磁感应强度测量信号进行退磁故障诊断,该方法可以可靠地检测并区分均匀和局部退磁故障,但需要在电机内部增设探测线圈,增加了额外的传感器成本。同时,电机内部紧凑的空间对探测线圈的安装也提出更高的要求。文献[16-17]提出了基于单槽反电动势波形进行转子局部退磁的诊断和定位方法,但单槽反电动势波形的获取通常需要预留绕组抽头或加装探测线圈。文献[18]采用卡尔曼滤波阶次跟踪算法对永磁同步电机的转矩信号进行处理,并根据转矩信号中的特征阶次分量进行退磁诊断。然而,转矩信号易受到外部干扰,不同的电机控制器设计参数也可能对电机的运行转矩产生影响,如仅以转矩信号作为故障诊断信号来源可能会出现误诊断现象。

高频信号注入法在永磁同步电机的无位置传感器控制领域应用广泛,近年来在故障诊断领域也得到了应用。文献[19-20]通过分析永磁同步电机在高频信号注入后的电流响应信号来诊断永磁体的退磁故障。然而,由于电机定子对外呈现阻感性,在较高的注入频率下,其电流响应的幅值通常较小,故障特征容易被电流传感器的噪声淹没。

为此,本文提出一种以零序电压作为故障诊断信号源,通过提取高频信号注入下零序电压中的故障特征进行局部退磁故障诊断的方法。与传统退磁故障诊断方法相比,本文所提方法仅针对局部退磁引起的故障特征,可以针对性地诊断局部退磁故障而不会受到均匀退磁故障的干扰。此外,由于故障特征来源于零序电压信号中的高频电压分量,幅值相对较大,不容易受到噪声的干扰,具有较高的诊断可靠性。

本文的组织结构如下:首先,通过有限元计算分析永磁同步电机局部退磁故障的影响,进行局部退磁故障电机的数学建模;在此基础上,分析局部退磁故障电机在高频信号注入下的响应特征并提出了对应的故障诊断方案;最后,通过实验验证所提出局部退磁故障诊断方法的有效性。

1 局部退磁故障的分析和建模

1.1 有限元分析

本文以一台36槽8极表贴式永磁同步电机为例进行研究,其截面图以及绕组链接方式如图1所示,表1给出该永磁同步电机的主要参数。

在进行有限元分析时,永磁同步电机的局部退磁故障可通过移除转子磁极的部分永磁体来模拟^[14],图2为健康电机、3N号极永磁体移除50%和3N号极永磁体完全移除3种状态下磁密分布的

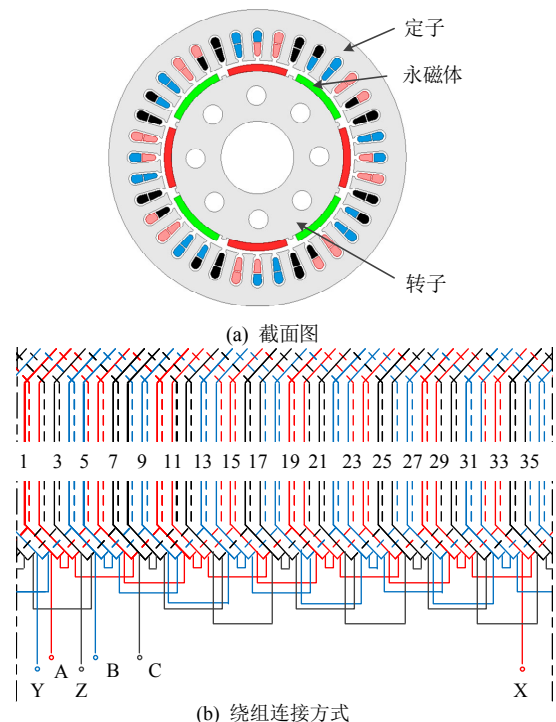


图1 永磁同步电机的结构示意图

Fig. 1 Diagram of PMSM structure

表 1 永磁同步电机主要参数
Table 1 Main parameters of PMSM

参数	数值	参数	数值
永磁磁链/Wb	0.281	永磁体厚度/mm	3
定子外径/mm	122.5	永磁体弧度/(°)	38
转子外径/mm	71	永磁体材料	N30SH
气隙长度/mm	1.5	硅钢片材料	50WW600

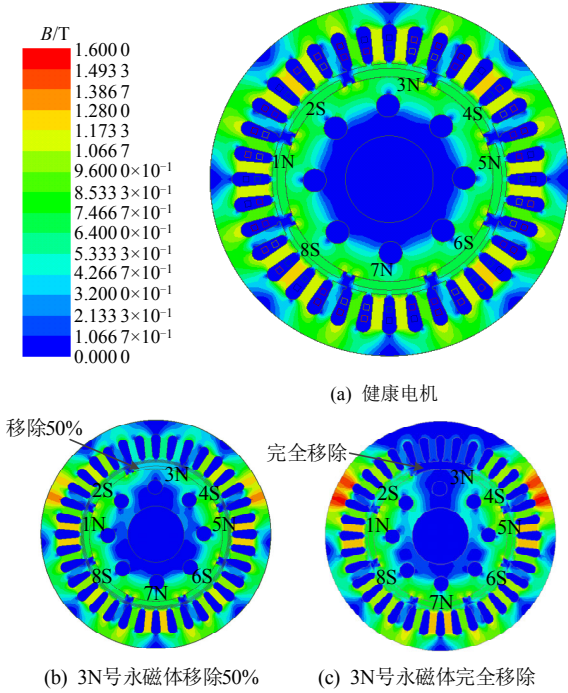


Fig. 2 Magnetic density distribution diagram of PMSM

有限元结果。从图 2 可以看出，在移除 50%或全部 3N 号极永磁体后，电机定子的磁密分布出现了明显的畸变，在 3N 号永磁体同极性的永磁体(即 1、5、7N 号永磁体)正对位置的定子齿部出现了磁密上升的现象，在靠近 1N 和 2S 号永磁体交界处、4S 和 5N 号永磁体交界处的定子轭部磁密也有明显上升。这是由于 3N 号极永磁体的励磁能力的下降，相邻的 S 极永磁体(即 2S 和 4S 号永磁体)的磁链更多地通过永磁体(1、5、7N 号永磁体)进行闭合。

当电机定子磁密超过铁心材料励磁曲线的膝点后会饱和现象，并引起电机电感的变化。由于局部退磁故障发生在转子，电机定子局部饱和的部位也会随着转子转动，局部退磁故障对电机电感的影响会呈现周期性的变化。图 3 为电机定子 A 相自感随电角度变化的曲线以及对应的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)结果。从图 3 可以看出，A 相自感的波动随着局部退磁故障程度的加深而变得更为明显。从 FFT 分析结果中可以看出，在 A 相平均电感下降的同时，A 相自感中出现了较

为明显的“二阶”分量，且该自感在退磁磁极的轴线与 A 相绕组的轴线重合时最小，这是由于该位置 A 相自感的磁通路径受到饱和的影响最大。

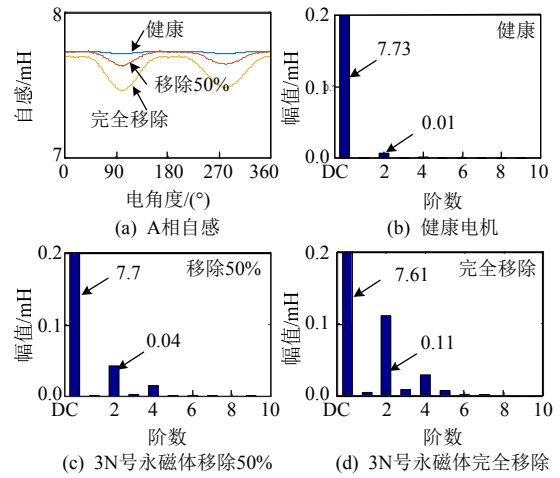


图 3 A 相自感

Fig. 3 Self-inductance of phase A

图 4 为 AB 相间互感的波形，AB 相间的互感在故障后也出现了“二阶”分量，且该互感在退磁磁极的轴线与 C 相轴线重合时感值最小。电机定子绕组自感和互感的变化均是受到了由局部退磁引起的局部饱和的影响。然而，当电机发生均匀退磁时，电机的整体磁通会出现均匀地下降，但并不会在电机中引起如图 3、4 中所出现的凸极性。

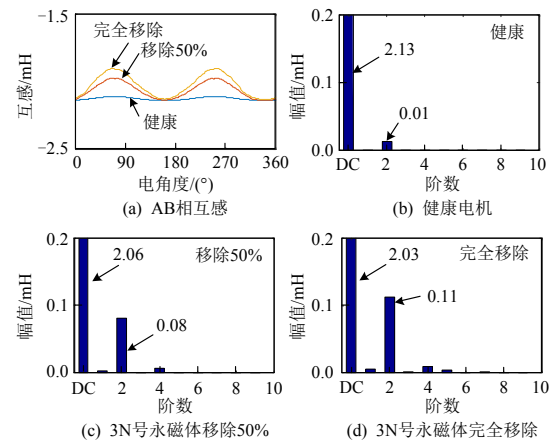


图 4 AB 相互感

Fig. 4 Mutual-inductance between phase A and B

图 5 为 A 相绕组的磁链波形，仿真中电机转速为 300 r/min，电周期为 0.05 s。从图 5 可以看出，健康电机的 A 相磁链主要由基波磁链和 3 次谐波磁链构成。局部退磁故障的发生仅使得 A 相的基波磁链和 3 次谐波磁链在幅值上有一定程度地下降，并未在 A 相磁链中引入新的谐波分量，该结果与文献[14]的分析结果一致，即局部退磁对绕组磁链的影响与均匀退磁故障类似。因此，仅基于磁链或反

电势估计的故障诊断算法,无法准确区分出局部退磁故障。

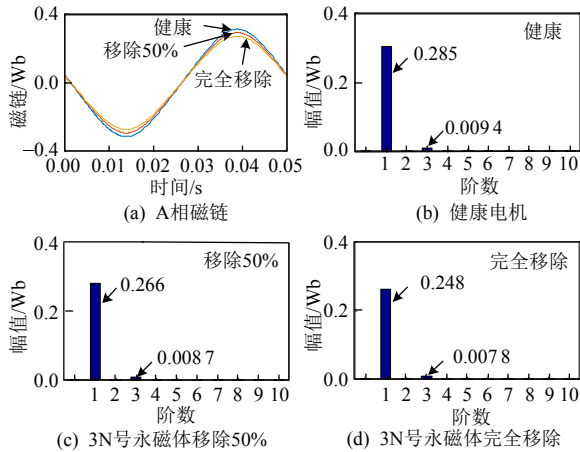


图5 A相磁链

Fig. 5 Flux linkage of phase A

1.2 数学建模

根据有限元分析结果可知,永磁体局部退磁故障后的电机电感会出现一定的“二阶”波动,呈现出与内置式永磁同步电机类似的凸极性,此时局部退磁后电机的电感矩阵 L_{dc} 可表示为

$$L_{dc} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & L_{cc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_a = (L - \Delta L_{dc}) - \Delta L_2 \cos 2\theta_e \\ L_b = (L - \Delta L_{dc}) - \Delta L_2 \cos 2(\theta_e - 2\pi/3) \\ L_c = (L - \Delta L_{dc}) - \Delta L_2 \cos 2(\theta_e + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} M_{ab} = (M + \Delta M_{dc}) + \Delta M_2 \cos 2(\theta_e + \pi/6) \\ M_{ac} = (M + \Delta M_{dc}) + \Delta M_2 \cos 2(\theta_e + 5\pi/6) \\ M_{bc} = (M + \Delta M_{dc}) + \Delta M_2 \cos 2(\theta_e - \pi/2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: L 、 M 分别为健康电机的自感和互感; ΔL_{dc} 、 ΔM_{dc} 分别为局部退磁故障后自感和互感在平均值上的变化量; ΔL_2 、 ΔM_2 分别为局部退磁故障后自感和互感中“二阶”波动的幅值; θ_e 为电机转子的电角度。

此外,局部退磁后电机的定子绕组磁链、反电势均有一定程度地下降,可以引入退磁系数 K_{dc} 描述磁链、反电势的下降。此时,局部退磁故障电机的电压方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_0 \\ u_0 \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + K_{dc} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & L_{cc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: u_a 、 u_b 和 u_c 为电机定子绕组端部的相电压; u_0 为定子中性点的电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为定子绕组的相电流; R 为定子绕组相电阻; e_a 、 e_b 和 e_c 为三相绕组的反电势。

2 局部退磁故障诊断

高频信号注入法在无位置传感器控制领域已经得到了广泛的应用,该方法通过分析高频响应信号即可确定电机转子的凸极位置。向电机注入的旋转高频电压 u_{ah} 和 u_{bh} 可记为

$$\begin{cases} u_{ah} = U_h \cos(\omega_h t) \\ u_{bh} = U_h \sin(\omega_h t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_h 为所注入旋转高频电压的幅值; ω_h 为注入电压的角频率。

与无位置传感器控制的思想类似,局部退磁可以通过分析高频信号注入后的响应信号来获取。

2.1 高频响应电流分析

将式(4)变换至 dq 旋转坐标系下,有

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_{df} \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_{qf} i_q \\ u_q = R i_q + L_{qf} \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_{df} i_d + K_{dc} \lambda_{PM}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 λ_{PM} 表示永磁体磁链, L_{df} 和 L_{qf} 满足:

$$\begin{cases} L_{df} = L - M + \Delta L_{dc} - \Delta M_{dc} - \Delta L_2 - \frac{1}{2} \Delta M_2 \\ L_{qf} = L - M + \Delta L_{dc} - \Delta M_{dc} + \Delta L_2 + \frac{1}{2} \Delta M_2 \end{cases} \quad (7)$$

由于高频信号注入的频率通常远高于电机的基波频率,在高频模型中可以忽略电机相绕组 R 、反电势以及 dq 坐标系下的交叉耦合项。此时,式(6)可以简化为

$$\begin{cases} u_{ah} = L_{df} \frac{di_{ah}}{dt} \\ u_{bh} = L_{qf} \frac{di_{bh}}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

联立式(5)、(8),可得

$$\begin{cases} i_{ah} = \frac{U_h \sin(\omega_h - \omega_e)t}{2(\omega_h - \omega_e)} \left(\frac{L_{df} + L_{qf}}{L_{df} L_{qf}} - \frac{L_{df} - L_{qf}}{L_{df} L_{qf}} \right) \\ i_{bh} = -\frac{U_h \cos(\omega_h - \omega_e)t}{2(\omega_h - \omega_e)} \left(\frac{L_{df} + L_{qf}}{L_{df} L_{qf}} + \frac{L_{df} - L_{qf}}{L_{df} L_{qf}} \right) \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)变换到静止坐标系下,并写成定子电流矢量形式,可以得到:

$$\begin{aligned} i_{\alpha\beta h} = & \frac{L_{df} + L_{qf}}{L_{df} L_{qf}} \cdot \frac{U_h}{2(\omega_h - \omega_c)} e^{j[\omega_h t - \frac{\pi}{2}]} + \\ & \frac{L_{df} - L_{qf}}{L_{df} L_{qf}} \cdot \frac{U_h}{2(\omega_h - \omega_c)} e^{j[\frac{\pi}{2} - (\omega_h - 2\omega_c)t]} \end{aligned} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 由于局部退磁引起电机的凸极性, 电机在高频旋转电压注入下的电流响应中除了以角频率 ω_h 正序旋转的高频电流之外还存在以 $(\omega_h - 2\omega_c)$ 角频率旋转的负序高频电流。然而, 从 1.1 节有限元分析结果可知, 局部退磁故障引入的电机凸极性较为微弱, 由该凸极性引起的负序高频电流幅值也较小。以注入频率 500 Hz、幅值为 10 V 的旋转高频电压为例, 电机参数采用 1.1 节中 3N 号永磁体完全移除状态的有限元结果, 根据式(10)计算得出此时负序高频电流幅值理论值约为 3.8 mA, 该特征较为微弱, 容易被幅值较大的基波电流和噪声淹没。

2.2 零序电压高频响应分析

永磁同步电机的零序电压可通过电阻网络测量, 如图 6 所示。如图 6 所示, 电阻网络的中性点 m 以及电机中性点之间的电压即为零序电压, 可以直接通过增加一个电压传感器来获取, 这种测量方法可以排除逆变器对零序电压的影响^[21]。

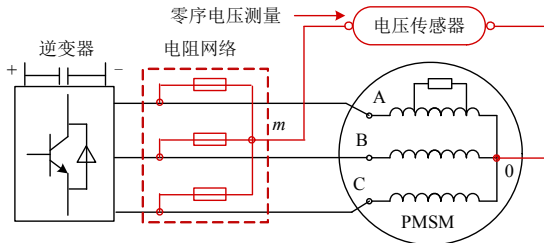


图 6 零序电压的测量

Fig. 6 Measurement of zero-sequence voltage

将式(4)的三行相加并化简, 可得

$$\begin{aligned} u_0 = & \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c) - \frac{1}{3}K_{dc} \frac{d}{dt}(e_a + e_b + e_c) + \\ & \frac{1}{3}(\Delta L_2 + \Delta M_2) \frac{d}{dt}[\cos 2\theta_c i_a + \cos 2(\theta_c - \frac{2}{3}\pi) i_b + \\ & \cos 2(\theta_c + \frac{2}{3}\pi) i_c] \end{aligned} \quad (11)$$

根据 2.1 节可知, 电机定子电流中负序高频电流幅值极小, 高频电流响应可近似认为仅由正序分量构成, 此时有

$$\begin{cases} i_{ah} = I_{hpdc} \cos(\omega_h t - \pi/2) \\ i_{bh} = I_{hpdc} \cos(\omega_h t + 5\pi/6) \\ i_{ch} = I_{hpdc} \cos(\omega_h t + \pi/6) \end{cases} \quad (12)$$

式中 I_{hpdc} 为正序高频响应电流的幅值, 满足

$$I_{hpdc} = \frac{L_{df} + L_{qf}}{L_{df} L_{qf}} \times \frac{U_h}{2(\omega_h - \omega_c)} \quad (13)$$

电阻网络的中性点 m 的电压满足

$$u_m = \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c) \quad (14)$$

联立式(11)、(12)、(14), 可得零序电压 u_{0m} 中的高频分量为

$$\begin{aligned} u_{0mh} = & \frac{1}{2}(\Delta L_2 + \Delta M_2)(\omega_h + 2\omega_c) \times \\ & I_{hpdc} \sin[(\omega_h + 2\omega_c)t - \frac{\pi}{2}] \end{aligned} \quad (15)$$

联立式(7)、(13)、(15), 可以求出零序电压 u_{0m} 中的高频分量幅值为

$$\begin{aligned} U_{0mh} = & \frac{1}{2} \frac{U_h(\omega_h + 2\omega_c)}{(\omega_h - \omega_c)} \times \\ & \frac{(L - M + \Delta L_{dc} - \Delta M_{dc})(\Delta L_2 + \Delta M_2)}{(L - M + \Delta L_{dc} - \Delta M_{dc})^2 - (\Delta L_2 + \frac{1}{2}\Delta M)^2} \end{aligned} \quad (16)$$

考虑到永磁同步电机局部退磁故障引起的饱和凸极性较为微弱, 此时有 $(\Delta L_2 + \Delta M_2)$ 远小于 $(L - M + \Delta L_{dc} - \Delta M_{dc})$ 。由于注入电机的高频电压频率远大于电机运行的基波频率, 可近似认为 $\omega_h + 2\omega_c \approx \omega_h \approx \omega_h - \omega_c$ 。因此, 式(16)可化简为

$$U_{0mh} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_h(\Delta L_2 + \Delta M_2)}{L - M + \Delta L_{dc} - \Delta M_{dc}} \quad (17)$$

同样, 以注入幅值 10 V 的旋转高频电压为例, 电机参数采用 3N 号永磁体完全移除状态的有限元结果, 根据式(17)计算得出零序中的故障高频响应电压的幅值理论值达到 195.7 mV。此外, 该分量的幅值仅由注入电压的幅值以及定子电感值的变化决定, 不受注入频率和电机运行负载大小的影响。

2.3 故障诊断方法

对于不存在凸极性的表贴式永磁同步电机, 其 ΔL_2 和 ΔM_2 都为 0, 此时其零序电压中不存在频率为 $\omega_h + 2\omega_c$ 的分量。如永磁同步电机发生了局部退磁故障, 受到局部饱和的影响, 电机将呈现一定的凸极性, 此时零序电压 u_{0m} 中将会出现频率为 $\omega_h + 2\omega_c$ 的故障分量。相对的, 均匀退磁故障并不会引起电机的局部饱和, 电机的凸极性也不会发生变化。因此, 本文所提诊断方法可以准确地诊断局部退磁故障, 并不会因为电机均匀退磁而出现误诊断。在实际运

行过程中，电机的基波频率以及所注入的旋转电压的频率均为已知量，可通过提取对应频率 $\omega_h+2\omega_e$ 的零序电压分量的幅值，有针对性地进行局部退磁的故障诊断。

图7为本文所提基于高频信号注入的局部退磁故障诊断方法的流程图。在向电机注入旋转高频电压后，从在线测量的零序电压 u_{0m} 中提取对应角频率 $\omega_h+2\omega_e$ 的分量幅值作为故障指示器，如果该值大于设定的阈值，则判断该永磁同步电机中发生了局部退磁故障，否则认为电机仍处于健康状态。需要说明的是，设置阈值是实际工程应用中常见的避免误诊断的手段，但在数值设置方面还应考虑到设计、加工和信号处理等因素的影响。表2给出通过有限元分析获得的3N号极永磁体不同退磁状态下的故障特征，可见对于该36槽8极的表贴式永磁同步电机，在不考虑信号干扰等因素影响的情况下，其阈值设置在0.018~0.02V之间就可以确保本文方法能可靠地诊断出10%及以上的永磁体退磁故障。然而，由于信号处理过程总是存在着噪声干扰和量化误差等，所提取的故障特征值也会产生一定的波动。此时，单纯减小阈值虽可以在一定程度上提高轻微退磁故障诊断能力，但难以避免发生故障误判。如果未来工业界在传感技术、信号处理及

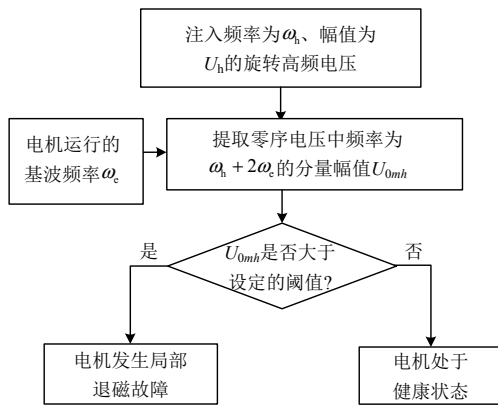


图7 局部退磁故障诊断流程图

Fig. 7 Flowchart of local demagnetization detection

表2 3N号极永磁体不同退磁状态下的故障特征

Table 2 Fault feature under different levels of 3N-magnet demagnetization

永磁体退磁程度/%	U_{0mh} 幅值/V
0(健康)	0.018
10	0.021
25	0.032
50	0.105
75	0.143
100	0.196

计算机技术等领域取得更大突破，本文所提方法有望可以进一步提高局部退磁故障诊断的能力。

3 实验验证

3.1 实验平台

为了进一步验证本文所提局部退磁故障诊断方法的性能，搭建了如图8所示的永磁同步电机对拖实验平台。为了模拟局部退磁故障，测试电机配备了一个正常转子和退磁转子，其中退磁转子中的一块永磁体经交流退磁工艺完全退磁，如图9(a)所示。需要指出的是，直接移除永磁体也可以在电磁层面上达成同样的效果，但此时电机转子的质量不对称，在电机运行时，转子质量的不对称会引起额外的噪声和电流谐波。此外，该测试电机的定子绕组预留了匝比为0和5%的抽头，如图9(b)所示，可用于测量定子部分绕组的反电势。

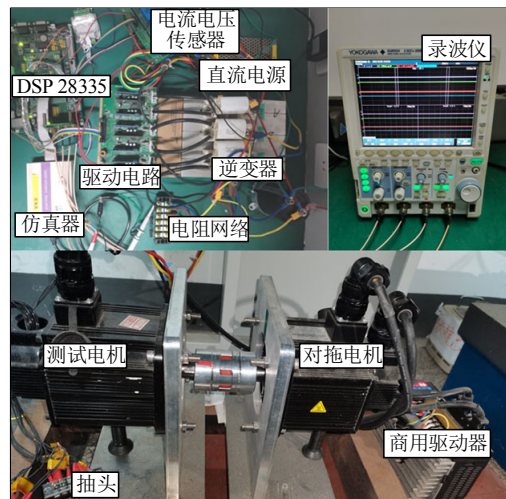
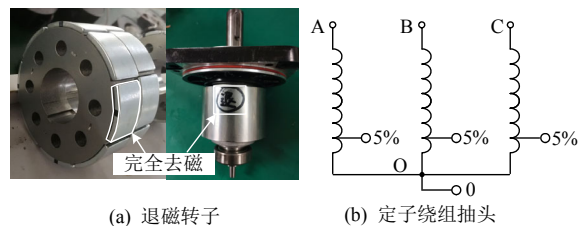


图8 实验平台

Fig. 8 Experimental platform



(a) 退磁转子 (b) 定子绕组抽头

图9 退磁转子和定子绕组抽头

Fig. 9 Demagnetized rotor and stator winding taps

3.2 实验结果

图10为永磁同步电机运行在300r/min时的空载反电势波形以及对应的FFT分析结果。从图10可以看出，健康电机A相绕组0抽头和5%抽头之间的空载反电势主要由基波和3、5次谐波构成，THD为21.81%。A相绕组整体的空载反电势主要由基波、3次谐波分量构成，由于不存在5次谐波，

THD 仅为 14.8%。从图 10(c)可以看出，局部退磁之后 A 相绕组 0 抽头和 5%抽头之间的空载反电势出现了明显的畸变，从 FFT 的结果可以发现，电机在基波附近出现了一系列的间谐波分量，THD 也上升至 23.47%。然而，图 10(d)中局部退磁电机 A 相绕组整体的空载反电势中并不存在相应的间谐波分量，这是由于该电机 A 相绕组的线圈为串联连接，单个线圈中存在的反电势间谐波分量随着线圈的串联相抵消。因此，局部退磁后，电机 A 相绕组的空载反电势仅分别在基波和 3、5 次谐波分量的幅值上有一定程度地下降，并未产生额外的谐波分量，THD 也与图 10(b)中健康电机的结果基本一致，这与上文的有限元分析结果一致。

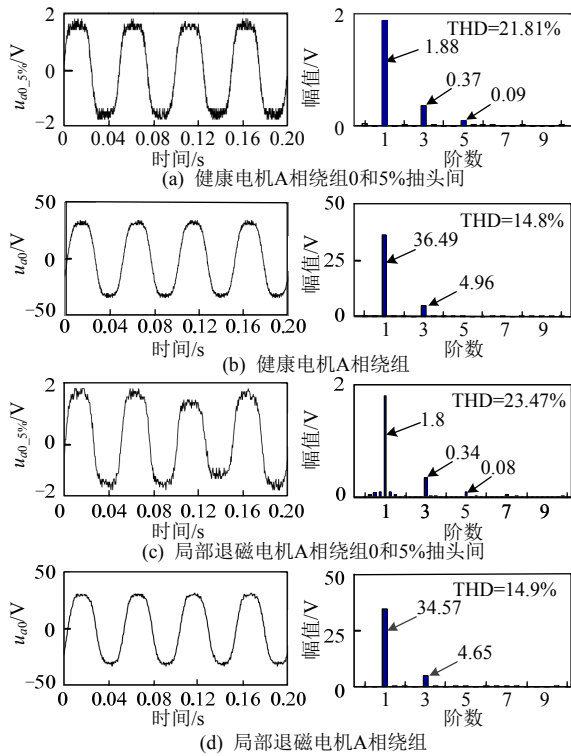


图 10 永磁同步电机的空载反电势波形和 FFT 结果
Fig. 10 Waveforms and FFT results of the PMSM back-electromotive force

图 11 为永磁同步电机转速在 300 r/min 时，以额定电流状态运行的零序电压波形，实验中向电机注入了幅值为 10 V、频率为 500 Hz 的旋转高频电压。由图 11 可以看出，局部退磁故障后电机的零序电压幅值有轻微下降。图 12 给出注入如图 11 所示旋转高频电压后的电机零序电压 FFT 结果，实验中电机转速 300 r/min 对应的基波频率为 20 Hz。从图 12 可以看出，健康电机的零序电压中也出现了频率为 540 Hz 的分量，这是由于实验中采用的表贴式永磁同步电机具有微弱的凸极性。当电机发生局

部退磁故障后，受到局部退磁带来的饱和影响，电机的凸极性有所增强，零序电压中频率为 540 Hz 分量幅值明显增加并超出预先设定的阈值，此时可诊断电机发生了局部退磁故障。需要说明的是，故障电机的零序电压中还出现了频率为 420 Hz 的分量，这是由电机负序高频电流响应在零序电压中激发的故障特征，但由于负序高频电流幅值较小，该分量的幅值远小于 540 Hz 的零序电压分量。

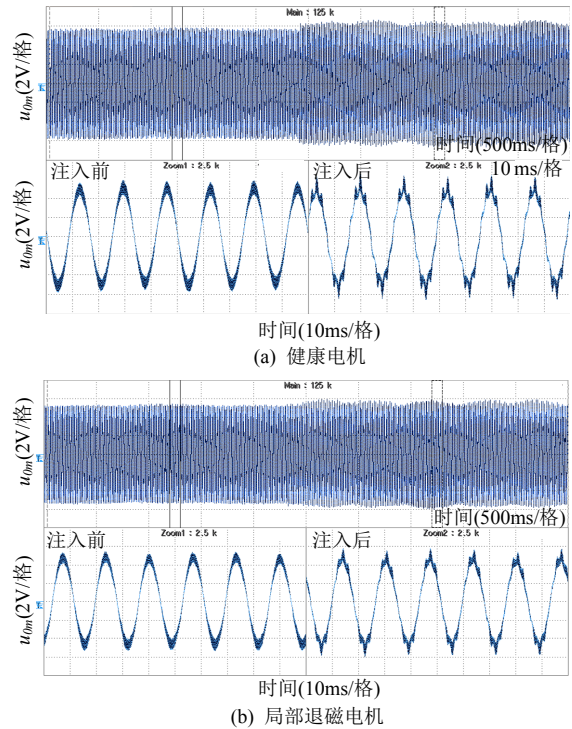


图 11 永磁同步电机在 300 r/min 时的零序电压波形
Fig. 11 Waveforms of the PMSM zero-sequence voltage at 300 r/min

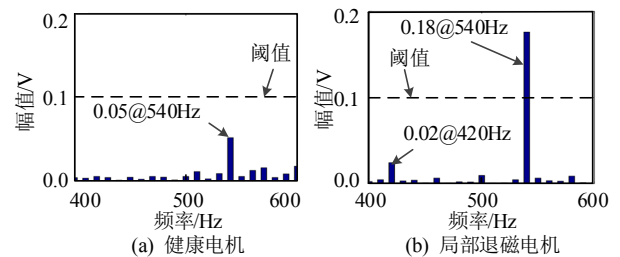


图 12 永磁同步电机在 300 r/min 时的零序电压 FFT 结果
Fig. 12 FFT results of the PMSM zero-sequence voltage at 300 r/min

图 13 为永磁同步电机运行在 150 r/min，并以额定电流状态运行的零序电压 FFT 结果，实验中向电机注入了与图 11 中相同的旋转高频电压。此时，电机运行的基波频率为 10 Hz，从图 11 可以看出，此时健康电机和故障电机的零序电压中的特征分量频率变为 520 Hz，该特征分量的频率与注入电压的频率以及电机运行的基波频率有关，具体为

$\omega_h+2\omega_e$, 与 2.2 节的理论分析一致。此外, 对比图 12(b)和图 13(b)中的结果可以发现, 零序电压中的高频故障分量仅在频率上有变化, 幅值方面几乎未受到电机转速变化的影响。

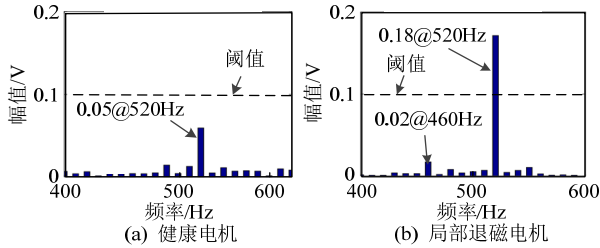


图 13 永磁同步电机在 150 r/min 时的零序电压 FFT 结果
Fig. 13 FFT results of the PMSM zero-sequence voltage at 150 r/min

图 14 为向局部退磁故障电机注入幅值为 10 V、不同频率的旋转高频电压下的 U_{0mh} 结果, 永磁同步电机转速在 300 r/min 时以额定电流运行。由图 14 可以看出, 电机零序电压信号中的高频故障分量幅值几乎不随注入信号的频率变化而变化, 与式(17)得到的结论一致。考虑到旋转高频电压信号的注入频率不应太过接近 PWM 频率, 否则注入信号会发生不可忽略的畸变^[21-22]。此外, 降低注入频率则会带来较大的转矩和转速抖动。因此, 综合考虑注入性能和对电机引入的扰动影响, 建议实际应用中注入的电压频率设定为 PWM 频率的 1/10 左右。

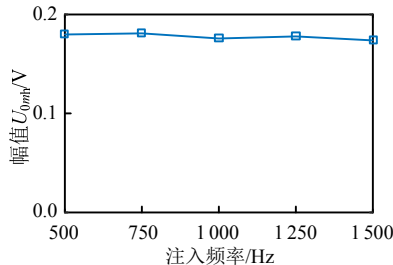


图 14 不同注入频率下的零序电压幅值

Fig. 14 Extracted U_{0mh} at different injection frequencies

4 结论

针对永磁同步电机局部退磁故障, 本文结合有限元分析的结果建立了局部退磁故障电机的数学模型。基于该数学模型, 分析了局部退磁故障电机在高频信号注入下的特征, 得到如下结论:

1) 局部退磁故障会导致定子的局部饱和, 进而增加电机的凸极性, 而该特征在均匀退磁故障下并不会发生;

2) 高频信号注入会在局部退磁电机的定子电流中引起负序高频电流, 但该分量的幅值较小;

3) 高频信号注入下, 局部退磁故障电机的零

序电压里存在频率为 $\omega_h+2\omega_e$ 的故障特征分量, 幅值相对较大, 可用于进行局部退磁故障的诊断, 实验结果也验证了所提局部退磁故障诊断方法的有效性。

参考文献

- [1] 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): 340-350.
HANG Jun, HU Qitao, DING Shichuan, et al. Robust detection and location of inter-turn short circuit fault in permanent magnet synchronous motor based on square of residual current vector modulus[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 340-350 (in Chinese).
- [2] 崔刚, 熊斌, 李振国, 等. 转子温度空间分布差异诱发永磁电机局部失磁特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2437-2447.
CUI Gang, XIONG Bin, LI Zhenguo, et al. Research on local demagnetization characteristics of permanent magnet motor induced by spatial distribution difference of rotor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2437-2447(in Chinese).
- [3] 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.
- [4] 丁石川, 吴振兴, 李亚, 等. 基于气隙磁密差信号峭度因子的永磁同步电机局部退磁故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5747-5756.
Partial demagnetization fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine based on the kurtosis of air-gap flux density difference signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5747-5756 (in Chinese).
- [5] ZHU Min, HU Wensong, KAR N C. Acoustic noise-based uniform permanent-magnet demagnetization detection in SPMSM for high-performance PMSM drive[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 303-313.
- [6] ZHU Min, HU Wensong, KAR N C. Multi-sensor fusion-based permanent magnet demagnetization detection in permanent magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 8110106.
- [7] 徐敦煌, 王东, 林楠, 等. 失磁故障下交错磁极混合励磁发电机的等效二维解析磁场模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 87-93.
XU Dunhuang, WANG Dong, LIN Nan, et al. An equivalent two-dimensional analytical model for the consequent-pole hybrid-excitation generator with demagnetization fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 87-93 (in

- Chinese).
- [8] 谢颖, 姜佳宁, 蔡蔚, 等. 表贴式高速永磁同步电机失磁故障及磁体选区渗重稀土研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(2): 44-53.
XIE Ying, JIANG Jianing, CAI Wei, et al. Study on the demagnetization failure of surface mount high speed permanent magnet synchronous motor and Local infiltration of heavy rare earth[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(2): 44-53(in Chinese).
- [9] 李红梅, 陈涛. 电动汽车 PMSM 退磁故障诊断及故障模式识别[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 1-8.
LI Hongmei, CHEN Tao. Demagnetization fault diagnosis and fault mode recognition of PMSM for EV[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 1-8 (in Chinese).
- [10] LE ROUX W, HARLEY R G, HABELTLER T G. Detecting rotor faults in low power permanent magnet synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 322-328.
- [11] 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.
ZHANG Yecheng, LIU Guohai, CHEN Qian. Discrimination of interturn short-circuit and local demagnetization in permanent magnet synchronous motor based on current fluctuation characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1634-1643, 1653 (in Chinese).
- [12] URRESTY J C, RIBA J R, ROMERAL L. A back-EMF based method to detect magnet failures in PMSMs[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(1): 591-598.
- [13] CAO Liqian, WU Zhong. On-line detection of demagnetization for permanent magnet synchronous motor via flux observer[J]. Machines, 2022, 10(5): 354.
- [14] URRESTY J C, RIBA J R, DELGADO M, et al. Detection of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by means of the zero-sequence voltage component[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(1): 42-51.
- [15] 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): 332-340.
DING Shichuan, HE Wang, HANG Jun, et al. Uniform demagnetization fault diagnosis for PMSM based on radial air-gap flux density and stator current[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 332-340 (in Chinese).
- [16] 钟钦, 马宏忠, 梁伟铭, 等. 电动汽车永磁同步电机失磁故障数学模型的初步研究[J]. 微电机, 2013, 46(6): 9-12, 18.
ZHONG Qin, MA Hongzhong, LIANG Weiming, et al. Preliminary analysis of demagnetization fault mathematical model for permanent magnet synchronous motor of electric vehicles[J]. Micromotors, 2013, 46(6): 9-12, 18 (in Chinese).
- [17] 钟钦, 马宏忠, 张志艳, 等. 基于反电动势数学模型分析电动汽车永磁同步电机失磁故障[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 35-40, 46.
ZHONG Qin, MA Hongzhong, ZHANG Zhiyan, et al. Analysis of demagnetization fault for PMSM of electric vehicle based on back-EMF mathematical model[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 35-40, 46 (in Chinese).
- [18] ZHU Min, YANG Bin, HU Wensong, et al. Vold-Kalman filtering order tracking based rotor demagnetization detection in PMSM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5768-5778.
- [19] HONG J, PARK S, HYUN D, et al. Detection and classification of rotor demagnetization and eccentricity faults for PM synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(3): 923-932.
- [20] MOON S, JEONG H, LEE H, et al. Detection and classification of demagnetization and interturn short faults of IPMSMs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9433-9441.
- [21] XU Zheng, ZHANG Jianzhong, CHENG Ming. Investigation of signal injection methods for fault detection of PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 2207-2216.
- [22] XU Zheng, ZHANG Jianzhong, XIONG Jian, et al. An Improved high-frequency voltage injection method for interturn short-circuit fault detection in PMSMs[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 3228-3239.



徐政

在线出版日期: 2024-05-20.

收稿日期: 2023-09-20.

作者简介:

徐政(1991), 男, 工学博士, 讲师, 主要从事永磁电机故障诊断和状态监测, 电机控制等研究, xuzheng@njit.edu.cn;

*通信作者: 张建忠(1970), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究为新能源发电和电力电子技术, jiz@seu.edu.cn;

姜永将(1986), 男, 工学博士, 讲师, 主要从事电机设计, 电机控制等研究, yongj@njupt.edu.cn;

邓富金(1983), 男, 东南大学青年首席教授, 博士生导师, 研究方向为模块化多电平, fdeng@seu.edu.cn.

(编辑 陈娟)