

基于 VMD 的永磁同步电机初期匝间短路故障检测方法

茅 宇, 杨 刘, 颜亮亮, 崔国庆
(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 在初期匝间短路故障检测中, 故障特征频率的幅值很小, 且易受到噪声信号的干扰, 导致无法检测出故障信号。针对以上问题, 提出了一种基于变分模态分解 (VMD) 与双对数频谱分析的永磁同步电机 (PMSM) 初期匝间短路故障检测方法。该方法利用 VMD 去除零序电压分量 (ZSVC) 中的噪声和相关谐波分量以突出故障特征分量。然后利用双对数频谱分析法对得到的信号进行频谱分析, 通过检测频谱图中是否含有故障特征频率来判断电机匝间短路故障。通过仿真和实物试验验证了该故障检测方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 匝间短路; 零序电压分量; 变分模态分解; 双对数频谱分析

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)09-0066-09

doi: 10.12177/emca.2022.085

Detection Method of Incipient Inter-Turn Short Circuit Fault of PMSM Based on VMD

MAO Yu, YANG Liu, YAN Liangliang, CUI Guoqing

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In the incipient stage inter-turn short circuit fault detection, the fault signal cannot be detected because the amplitude of fault characteristic frequency is very small and it is easy to be interfered by noise signal. To solve the above problems, a method based on variational mode decomposition (VMD) and double logarithmic spectrum analysis is proposed for the incipient stage inter-turn short circuit fault detection of permanent magnet synchronous motor (PMSM). The VMD is applied to remove the noise and related harmonic components in zero sequence voltage component (ZSVC) for highlighting the fault characteristic component. Then, the double logarithmic spectrum analysis method is used to analyze the obtained signal for inter-turn fault, and the fault of inter-turn short circuit can be judged by detecting the fault characteristic frequency in the spectrum diagram. The effectiveness of the proposed fault detection method is validated by the simulation and physical test.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); inter-turn short circuit; zero sequence voltage component (ZSVC); variational mode decomposition (VMD); double logarithmic spectrum analysis

0 引 言

近年来, 永磁同步电机 (PMSM) 由于其效率高及功率因数高、转矩控制精准、结构简单和噪声低等优点, 已广泛应用于航空航天、电动汽车、数控机床、智能机器人等高新技术领域^[1-3]。但因功

率密度大、安装空间狭小和散热环境恶劣等, PMSM 的故障发生率较高。而电机作为系统重要核心部件, 其可靠性将影响整个系统的性能, 一旦发生故障, 容易产生链式反应, 导致整个系统瘫痪。PMSM 在运行中通常出现的故障有匝间短路故障、偏心故障和退磁故障等, 根据文献[4]的统

收稿日期: 2022-03-09; 收到修改稿日期: 2022-07-27

作者简介: 茅 宇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机匝间短路故障检测。

计分析,匝间短路故障 (ISCFs) 约占 21% ~ 37%。因此,实现电机早期匝间短路故障检测尤为重要^[5-6]。

匝间短路故障诊断主要是基于振动信号频谱分析、电磁转矩分析和电机电流特征分析 (MCSA) 等分析来进行诊断的。但文献[7]还提出了一种利用指数判别分析 (IEDA) 提取和训练 ISCFs 的相电流信号的畸变特性,进行电机故障的诊断。在上述方法中, MCSA 方法具有显著的优势,但也存在缺点,如由 PMSM 驱动电路产生的谐波信号与匝间短路故障引起的定子电流谐波信号叠加,使得故障信号无法被准确检测出。因此,在实际运用中,该方法的灵敏度较低^[7]。文献[8-9]采用基于零序分量的诊断方法,克服了 MCSA 方法的局限性,并成功应用于电机的匝间短路故障检测。然而, PMSM 发生初期匝间短路故障时,在零序电压分量 (ZSVC) 中代表故障特征的基波和五次谐波分量的幅值比正常情况 ZSVC 中包含的三次谐波分量和九次谐波分量的幅值小^[10]。因此,在初期阶段的故障诊断中,故障特征容易被隐藏,使直接对 ZSVC 进行傅里叶频谱分析的方法失效,这就需要对传统的信号处理方法进行改进,从而提高故障检测的精度。

本文提出了一种基于 ZSVC、变分模态分解 (VMD) 和双对数频谱分析的初期匝间短路故障检测方法。VMD 是一种自适应、完全非递归的算法,抑制由模态混叠引起的噪声和冲击信号的影响,从而提高故障检测的精度。采用 VMD 去除 ZSVC 中的噪声和相关谐波分量以突出故障特征分量。利用双对数频谱分析对得到的信号进行分析,用于匝间故障检测。通过建立匝间短路故障的 PMSM 模型,并进行仿真和实物试验验证本文提出的故障检测技术。

1 带匝间故障的 PMSM 模型

图 1 为 a 相匝间故障时的 PMSM 等效模型,其中 a_1 为故障部分, a_2 为健康部分。故障电流 i_f 表示短路匝内的循环电流。具有匝间故障的三相 PMSM 的电压方程可表示为^[11-14]

$$\mathbf{U}_{f,abc} = \mathbf{R}_{sf} \mathbf{I}_{f,abc} + \mathbf{L}_{sf} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{f,abc} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_{sf} + \mathbf{U}_0 \quad (1)$$

其中, $\mathbf{U}_{f,abc} = [u_a \quad u_b \quad u_c \quad 0]^T$,

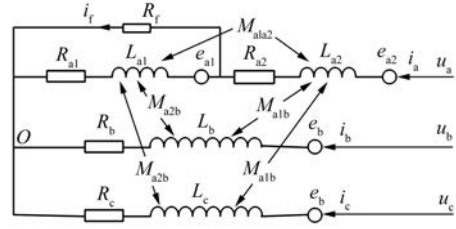


图 1 PMSM 的 a 相匝间故障等效模型

$$\mathbf{R}_{sf} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \eta R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 \\ \eta R_s & 0 & 0 & \eta R_s + R_f \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{I}_{f,abc} = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_f]^T,$$

$$\mathbf{L}_{sf} = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & \eta L_{AA} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & \eta M_{BA} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & \eta M_{CA} \\ \eta L_{AA} & \eta M_{AB} & \eta M_{AC} & \eta^2 L_{AA} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\psi}_{sf} = [\psi_{PM,a} \quad \psi_{PM,b} \quad \psi_{PM,c} \quad \psi_{PM,f}]^T,$$

$$\mathbf{U}_0 = [u_0 \quad u_0 \quad u_0 \quad 0]^T.$$

式中: $\mathbf{U}_{f,abc}$ 为定子绕组的相电压矩阵; u_a, u_b, u_c 分别为三相电压; R_s 为定子电阻; $\mathbf{R}_{sf}$ 为电阻矩阵; R_f 为短路电阻; η 为短路匝数比, $\eta = n/N$, n 和 N 分别为 a 相定子绕组的短路匝数和总匝数; $\mathbf{I}_{f,abc}$ 为电流矩阵; i_a, i_b, i_c 分别为三相电流; i_f 为故障电流; $\mathbf{L}_{sf}$ 为电感矩阵; L_{AA}, L_{BB}, L_{CC} 分别为三相绕组的自感; $M_{AB}, M_{BA}, M_{AC}, M_{CA}, M_{BC}, M_{CB}$ 分别为三相定子绕组之间的互感; $\boldsymbol{\psi}_{sf}$ 为绕组磁链矩; $\psi_{PM,a}, \psi_{PM,b}, \psi_{PM,c}$ 分别为三相磁链; $\psi_{PM,f}$ 为短路绕组磁链; $\mathbf{U}_0$ 为中性点电压矩阵; u_0 为中性点电压差。

$$\begin{cases} \psi_{PM,a} = \psi_{PM,1} \cos \theta + \sum_{i=2k+1}^{\infty} \psi_{PM,i} \cos(i\theta - \theta_i) \\ \psi_{PM,b} = \psi_{PM,1} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{i=2k+1}^{\infty} \psi_{PM,i} \cos\left(i\theta - \theta_i - 2i\frac{\pi}{3}\right) \\ \psi_{PM,c} = \psi_{PM,1} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{i=2k+1}^{\infty} \psi_{PM,i} \cos\left(i\theta - \theta_i + 2i\frac{\pi}{3}\right) \\ \psi_{PM,f} = \eta \psi_{PM,a} \end{cases} \quad (2)$$

式中: k 为正整数; $\psi_{PM,1}$ 为基波磁链幅值; $\psi_{PM,i}$ 为第 i 次谐波磁链幅值; θ 为转子电气位置; θ_i 为第 i 次谐波磁链与基波磁链之间的夹角。

匝间短路故障下的 PMSM 电磁转矩可以表示为

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c - e_f i_f}{\omega_n} \quad (3)$$

式中: ω_n 为 PMSM 转子机械角速度, $\omega_n = \omega_e/p$, ω_e 为转子电角速度, p 为 PMSM 的极对数; e_a 、 e_b 、 e_c 分别为 PMSM 旋转时, 永磁体转子在 A、B 和 C 相定子绕组中产生的反电动势。

2 故障诊断

2.1 ZSVC 原理

本文研究的是基于 ZSVC 的匝间短路故障诊断, 其带电阻网络的零序电压检测图如图 2 所示。 u_0 表示逆变器直流电压中性点与定子绕组中性点之间的电压差, u_0 可表示为^[15]

$$u_0 = \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c) + \frac{1}{3}\eta R_s i_f + \frac{1}{3}\eta(L + 2M) \frac{di_f}{dt} - \frac{d\psi_{PM,0}}{dt} \quad (4)$$

式中: $\psi_{PM,0} = (\psi_{PM,a} + \psi_{PM,b} + \psi_{PM,c})/3 = \sum_{i=3k, k=1,3,5,\dots} \psi_{PM,i} \cos(i\theta - \theta_i)$ 。

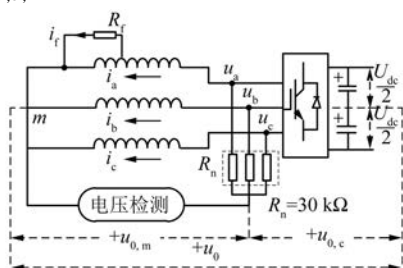


图2 带电阻网络的零序电压检测图

由式(4)可以看出 u_0 受到逆变器的影响。因此, 为了使 u_0 摆脱逆变器的影响, 采用三相平衡电阻网络^[16-17]。图 2 中的参数 $u_{0,m}$ 可以不受 PMSM 逆变器的影响, $u_{0,m}$ 可以表示为

$$u_{0,m} = \frac{1}{3}\eta R_s i_f + \frac{1}{3}\eta(L + 2M) \frac{di_f}{dt} - \frac{d\psi_{PM,0}}{dt} \quad (5)$$

正常运行的 PMSM 中不存在故障电流 i_f , 式

(5) 中 $u_{0,m}$ 只与 $\psi_{PM,0}$ 的时间导数有关。由式(5)可知, 在正常运行的 PMSM 中, $u_{0,m}$ 仅由三次谐波分量及其奇次倍谐波分量组成。然而, 在具有匝间短路故障的 PMSM 中, 由于故障电流 i_f 的存在, $u_{0,m}$ 不仅含有 $\psi_{PM,0}$, 而且含有 i_f 。 i_f 包含基波、三次谐波、五次谐波等奇次谐波分量。

因此, 在发生故障的 PMSM 中, $u_{0,m}$ 除了三次谐波分量及其奇次倍谐波分量外, 还有新增的谐波分量, 如基波、五次谐波和七次谐波等。在这些新增的谐波分量中, 基波与五次谐波分量幅值相对较大, 且对匝间短路故障的特征检测也最为敏感。因此, 选用基波与五次谐波分量作为匝间短路故障的标志。

2.2 VMD 算法

VMD 算法是一种将信号分解为快速和慢速振荡的完全非递归模态变分方法, 是一种具有自适应性、非递归性和准正交性的信号分解方法。VMD 利用变分原理将信号分解为 K 个本征模态函数(IMF)。假设每个 IMF 均是具有一个中心频率的有限带宽信号, 为求中心频率 ω_k 和 IMF 的 u_k , VMD 采用交替方向乘子法(ADMM)算法求解约束变分问题。VMD 的具体操作分为变分问题的构造和变分问题的解。

2.2.1 变分问题的构造

(1) 利用希尔伯特变换计算各阶模态函数的解析信号及其单侧谱:

$$\left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] * u_k(t) \quad (6)$$

式中: $\delta(t)$ 为脉冲函数; j 为虚数单位; $*$ 为卷积符号; u_k 为变分模态分解到的第 k 个 IMF 分量。

(2) 将每个模态频谱调制到相应估计中心频率:

$$\left\{ \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] * u_k(t) \right\} e^{-j\omega_k t} \quad (7)$$

(3) 通过高斯平滑解调估计每个模式的带宽, 从而得到约束公式如下:

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \left(\left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] * u_k(t) \right) e^{-j\omega_k t} \right\|^2 \right\} \quad (8)$$

2.2.2 变分问题的解

(1) 通过引入惩罚参数 α 和拉格朗日乘子因子 λ 来解决约束变分问题:

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \{\lambda\}) = \alpha \sum_k \left\| \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] \cdot u_k(t) \right\|_2^2 e^{-j\omega_k t} + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \lambda(t) \cdot f(t) - \sum_k u_k(t) > \quad (9)$$

式中: $f(t)$ 为给定的原始信号。

(2) 应用 ADMM 得到上面表达式的鞍点。因此,使用下面的表达式更新模态 u_k :

$$u_k^{n+1} = \underset{u_k, \omega_k}{\operatorname{argmin}} \left\{ \alpha \left\| \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] \cdot u_k(t) \right\|_2^2 e^{-j\omega_k t} + \left\| f(t) - \sum_i u_i(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (10)$$

(3) 利用 Parseval/Planchrel 傅里叶等距将上述问题转换到光谱域:

$$\hat{u}_k^{n+1} = \underset{\hat{u}_k, u_k \in X}{\operatorname{argmin}} \left\{ \alpha \left\| j\omega \left([1 + \operatorname{sgn}(\omega + \omega_k)] \hat{u}_k(\omega + \omega_k) \right) \right\|_2^2 + \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (11)$$

(4) 使用 $\omega - \omega_k$ 替换 ω 的变化:

$$\hat{u}_k^{n+1} = \underset{\hat{u}_k, u_k \in X}{\operatorname{argmin}} \left\{ \alpha \left\| j(\omega - \omega_k) \cdot \left([1 + \operatorname{sgn}(\omega + \omega_k)] \hat{u}_k(\omega) \right) \right\|_2^2 + \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (12)$$

将式(12)转化为非负频率区间积分形式:

$$\hat{u}_k^{n+1} = \underset{\hat{u}_k, u_k \in X}{\operatorname{argmin}} \left\{ \int_0^\infty \alpha (\omega - \omega_k)^2 |\hat{u}_k(\omega)|^2 + 2 \left| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right|^2 d\omega \right\} \quad (13)$$

这个二次优化问题的解如下:

$$\hat{u}_k^{n+1} = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (14)$$

将中心频率问题转化为傅里叶域,最终得到优化:

$$\omega_k^{n+1} = \underset{\omega_k}{\operatorname{argmin}} \left\{ \int_0^\infty (\omega - \omega_k)^2 |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega \right\} \quad (15)$$

最后,得到中心频率的更新:

$$\omega_k^{n+1}(\omega) = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (16)$$

VMD 的计算过程:

步骤 1 初始化 $\{u_k^1\}$ 、 $\{\omega_k^1\}$ 、 λ^1 和 n 的值。

步骤 2 使 $n=n+1$, 执行循环程序。

步骤 3 根据式(9)和式(11)更新 u_k 和 ω_k 。

步骤 4 使 $k=k+1$, 重复步骤 3, 直到 $k=K$ 。

步骤 5 根据 $\lambda^{n+1} = \lambda^n + \tau(f - \sum u_k^{n+1})$ 更新 λ 。

步骤 6 重复上述迭代过程, 直到函数收敛, 即满足条件 $\sum_k (\|\hat{u}_k^{n+1}\|_2^2 / \|\hat{u}_k^{n+1}\|_2^2) < \xi$, 其中 ξ 是给定的精度要求。当迭代过程停止时, 得到 K 个 IMF。

2.3 故障诊断流程

为了提高基于 ZSVC 的故障诊断方法的性能, 提出了对 ZSVC 信号进行 VMD 分析, 得到包含三次和五次谐波的 IMF 分量。然后对 IMF 分量进行双对数频谱分析, 通过观察基波与五次谐波分量幅值的变化来检测匝间短路故障。此外, 为了进一步详述所提出的方法, 设计了如图 3 所示的故障诊断流程图。



图3 故障诊断流程图

3 仿真分析

3.1 联合仿真模型

采用 Simulink、ANSYS Maxwell 与 ANSYS Electronics 对本文所提方法进行联合仿真分析。PMSM 的主要参数如表 1 所示, 搭建的联合仿真模型如图 4 所示, 该仿真系统包含了三相逆变桥、PMSM 有限元模型、空间矢量脉宽调制(SVPWM)和 Simulink 与 ANSYS Electronics 链接部分等模块。

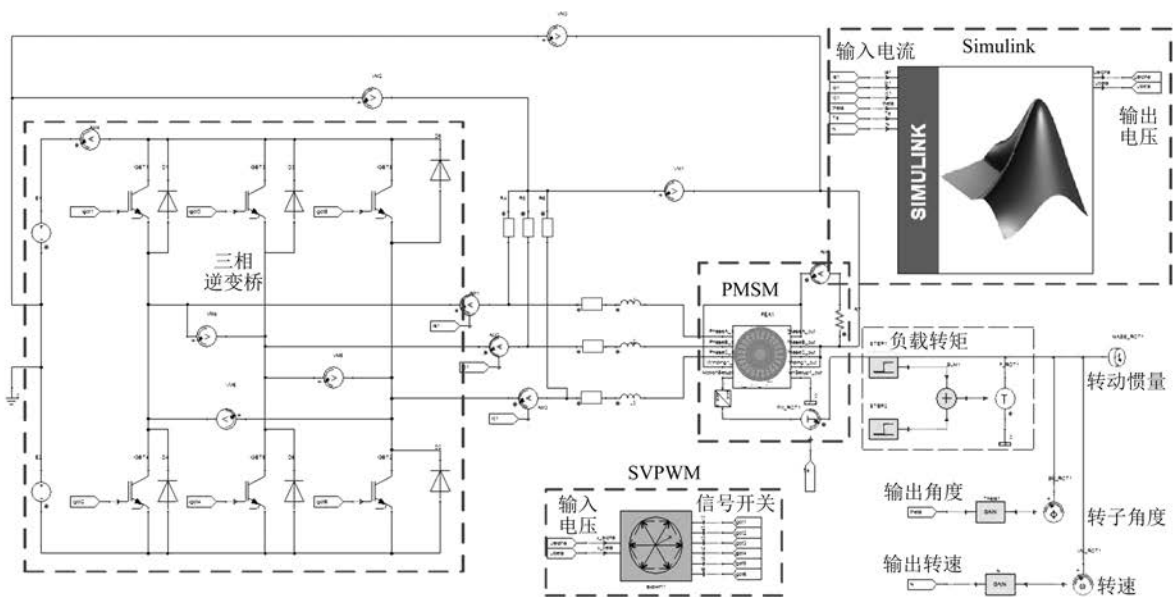


图4 联合仿真模型图

表1 PMSM 的主要参数

参数名称	参数值
极对数 p	2
定子电阻 R_s/Ω	4.4
自感 L/H	0.001 5
磁链 ψ/Wb	0.53
故障电阻 R_f/Ω	1
额定电流 I_e/A	2.5
额定功率 P_e/W	550
额定转矩 $T_m/(N\cdot m)$	3.5
额定转速 $n/(r\cdot min^{-1})$	1 500
额定电压 U/V	220
频率 f/Hz	50

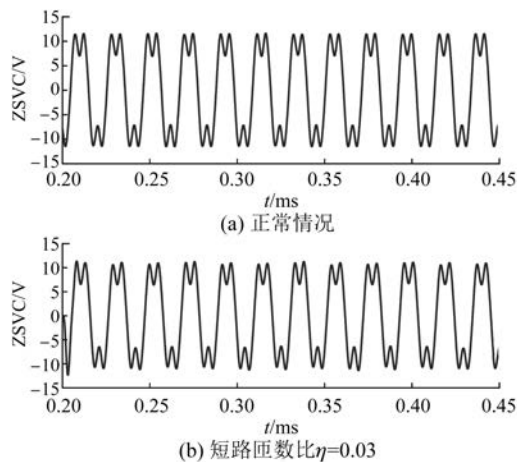


图5 正常和故障情况下的 ZSVC 波形

3.2 基于 ZSVC 的故障诊断

图 5(a) 和图 5(b) 分别给出了 PMSM 在参考转速为 480 r/min, 基波频率 $f_1 = n \times p / 60 = 16$ Hz, 负载转矩为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$, 短匝比 η 为 0.03, $R_f = 1\ \Omega$, 正常和匝间短路故障工况下的 ZSVC 波形。当匝间短路故障发生时, 与正常情况相比, $u_{0,m}$ 中理论上出现了基波 (16 Hz) 和五次谐波分量 (80 Hz)。然而, 当匝间故障发生初期, 与三次谐波、九次谐波等其他谐波分量相比, 基波和五次谐波分量的幅值很小, 如图 6 所示, 无法准确检测出基波和五次谐波。

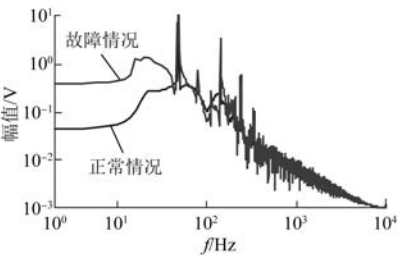


图6 正常情况和短匝比 $\eta=0.03$ 时的 ZSVC 频谱分析图

本文针对初期匝间短路故障采用双对数频谱分析难以检测故障的问题, 提出了具有强抗噪能

力的 VMD 与双对数频谱分析相结合的方法。采用 VMD 去除 ZSVC 中的噪声和相关谐波分量以突出故障特征分量。然后利用双对数频谱分析对得到的信号进行分析,提取故障特征。

按照图 3 所示流程图对故障信号进行处理,对 ZSVC 信号进行 VMD,经试验及查阅相关资料,得出惩罚因子为 $\alpha=2\ 000$, $DC=0$, $t=0$, $tol=10^{-7}$, $\varepsilon=10^{-7}$ 。VMD 受分解模态数 K 值的影响较大, K 较小时,会滤除掉重要信息; K 较大时,分解时会产生模态混叠,根据中心频率进行模态数的选取,不同 K 值时的各模态中心频率如表 2 所示。

表 2 不同 K 值时各模态的中心频率 Hz				
K 值	第一分量	第二分量	第三分量	第四分量
2	49	141	-	-
3	47	143	240	-
4	46	144	241	19

由表 2 可知,当 $K=2$ 时,第二分量的中心频率为 141 Hz,导致中心频率为 240 Hz 的模态信息丢失;当 $K=4$ 时,第四分量的中心频率为 19 Hz,导致模态过分解现象,因此 K 的值选 3 较为合适。

对 ZSVC 进行 VMD 分解,图 7 所示为短路匝数比为 $\eta=0.03$ 时的 ZSVC 的 VMD 分解图。其中 IMF1 对应的中心频率为 47 Hz,而包含了故障信息的基波和五次谐波为 16 和 80 Hz,因此选取 IMF1 作为故障后续处理信号。

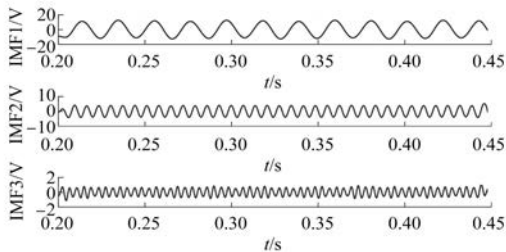


图 7 短路匝数比 $\eta=0.03$ 时的 ZSVC 的 VMD 分解图

图 8~图 10 为不同短路匝数比时的 ZSVC 频谱图。从图 8~图 10 中可以明显观察到故障特征频率基波与五次谐波信号,其中基波幅值大于五次谐波幅值,且随着故障短路匝数比的增大,基波和五次谐波分量幅值越大,越容易识别出故障信号。

4 实物试验

试验平台主要包括 3 部分:电源系统、电机拖

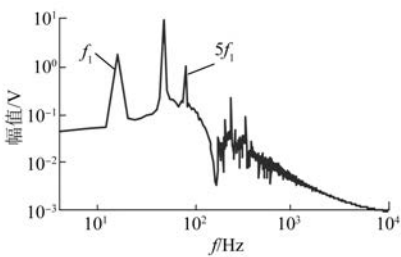


图 8 短路匝数比 $\eta=0.03$ 时的 ZSVC 频谱图

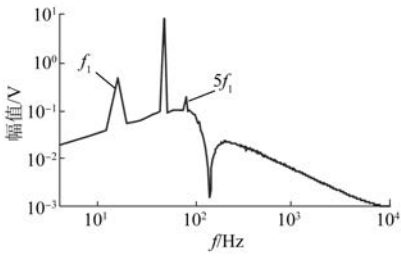


图 9 短路匝数比 $\eta=0.02$ 时的 ZSVC 频谱图

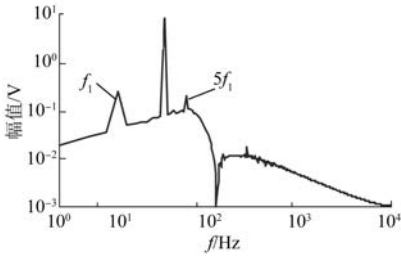


图 10 短路匝数比 $\eta=0.01$ 时的 ZSVC 频谱图

动系统及数据采集系统。电源系统主要由 50 Hz 工频电源和西门子 M440 变频器 2 部分组成。电机拖动系统主要由 PMSM、直流电机以及电阻箱组成。数据采集系统主要由电流传感器、示波器及数据采集卡组成。

如图 11 所示,被测试的设置匝间短路故障的 PMSM 与给 PMSM 施加负载的磁粉制动器通过一个联轴器直接连接。为了消除逆变器的影响,采用图 2 所示的三相平衡电阻网,电阻网中的电阻值为 30 kΩ。除 R_f 外,用于实物试验的 PMSM 的主要参数与用于仿真分析的相同。在本试验中,测试用 PMSM 的匝间故障是通过将绕组抽头与一根导线连接的。根据短路匝数比公式 $\eta=n/N$, A_5 、 A_{10} 、 A_{15} 和 A_{20} 是对应的 4 个短路匝数,其与总匝数的比就是对应的短路匝数比。试验中, PMSM 的转子转速为 480 r/min,采样频率 F_s 为

5 000 Hz。此外,应该注意的是,随着被测试的 PMSM 匝间短路故障的匝数增加, PMSM 处于高速运行时可能导致较大的短路电流,所以在短路绕组间串联一个故障电阻 R_f ($R_f = 7 \Omega$),且使电机处于低速状态下进行试验,避免出现较大的故障电流损害被测试的 PMSM 定子绕组。

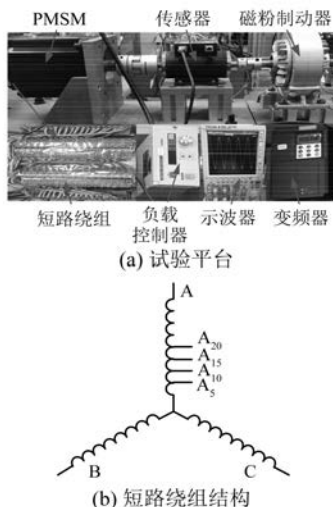


图 11 试验平台及短路绕组结构

图 12 和图 13 分别为正常情况下 ZSVC 的波形及频谱。将对正常情况时的 ZSVC 进行 VMD 分解,结果如图 14 所示。图 15 和图 16 分别为短路匝数比 $\eta = 0.1$ 时故障条件下 ZSVC 波形及频谱。由于振幅很小,谐波分量和噪声,基波分量在频谱中几乎观测不到。为了检测基频,对故障条件下的 ZSVC 进行 VMD 分解,结果如图 17 所示。

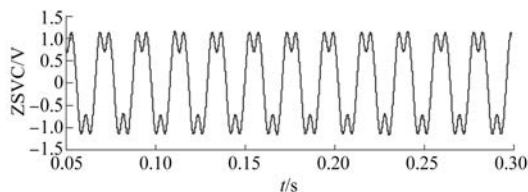


图 12 正常情况 ZSVC 波形

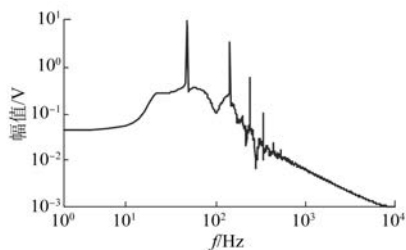


图 13 正常情况 ZSVC 频谱

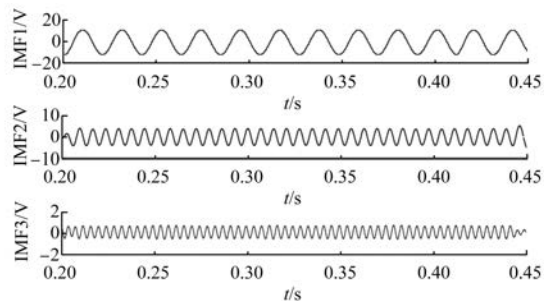


图 14 正常情况时的 ZSVC 的 VMD 分解图

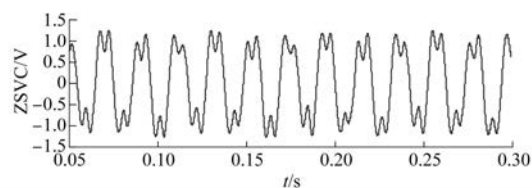


图 15 $\eta = 0.1$ 匝间故障 ZSVC 波形

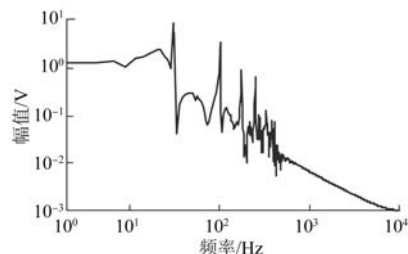


图 16 $\eta = 0.1$ 匝间故障 ZSVC 频谱

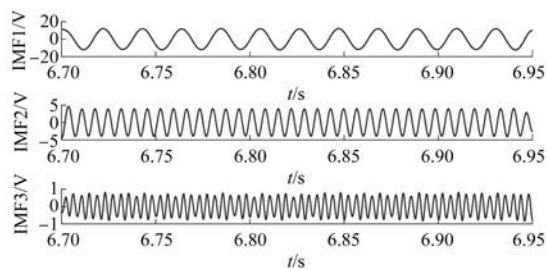


图 17 短路匝数比为 $\eta = 0.1$ 时 ZSVC 的 VMD 分解图

图 18 为正常情况时的 IMF1 频谱图,没有基波和五次谐波频率。图 19 和图 20 为 $\eta = 0.05$ 和 $\eta = 0.1$ 的匝间故障条件下 IMF1 频谱分析图,可以明显观察到基波频率和五次谐波频率。

5 结 语

PMSM 匝间故障在发生初期,由于其故障特征容易被干扰,通常难以准确检测出故障特征信

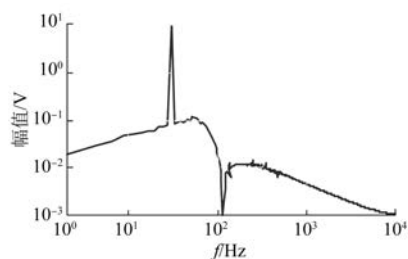
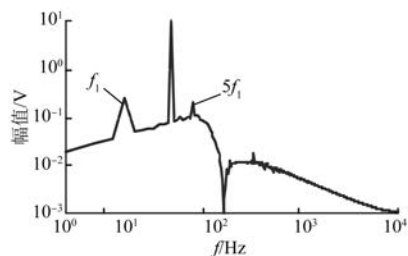
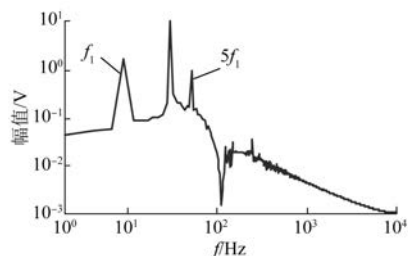


图 18 正常情况时的 IMF1 频谱图

图 19 短路匝数比为 $\eta=0.05$ 时的 IMF1 频谱图图 20 短路匝数比为 $\eta=0.1$ 时的 IMF1 频谱图

号。因此,本文提出了一种基于 VMD 与双对数频谱分析的 PMSM 匝间短路故障诊断的方法。采用 VMD 与双对数频谱分析方法对 ZSVC 信号进行分析,得到故障特征分量。仿真和实物试验结果表明,该方法对 PMSM 匝间故障的早期诊断是有效的。

同时,需要注意的是,测量 ZSVC 需要一个可接近的定子绕组中性点。文中采用电阻网络是在不破坏电机原有的结构情况下进行试验的。而容错 PMSM 驱动系统的中性点是可访问的,将所提出的故障检测方法与容错方法相结合,可以大大提高 PMSM 驱动系统的可靠性。

【参考文献】

[1] CHENG M, ZHU Y. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: a review

[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 88: 332.

[2] ZHU X, XIANG Z, QUAN L, et al. Multimode optimization design methodology for a flux-controllable stator permanent magnet memory motor considering driving cycles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5353.

[3] WANG W, CHENG M, ZHANG B, et al. A fault-tolerant permanent-magnet traction module for subway applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1646.

[4] SEN B, WANG J. Stator interturn fault detection in permanent-magnet machines using PWM ripple current measurement [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3148.

[5] AFRANDIDEH S, MILASI M E, HAGHJOO F, et al. Turn to turn fault detection, discrimination, and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 292.

[6] QI Y, ZAFARANI M, GURUSAMY V, et al. Advanced severity monitoring of interturn short circuit faults in PMSMs [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(2): 395.

[7] 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.

[8] 王志兴. 双馈风力发电机绕组匝间短路故障的建模与分析[D]. 北京:华北电力大学, 2016.

[9] 李俊卿,李忠徽,全宗义. 基于信息融合的双馈风机定子匝间短路故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 99.

[10] XIAO L, GAO F, HOU S, et al. Different faults diagnosis and classification on-line in permanent magnet synchronous machines using improved exponential discriminant analysis [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(9): 1365.

[11] ROSERO J A, ROMERAL L, ORTEGA J A, et al. Short-circuit detection by means of empirical mode decomposition and Wigner-Ville distribution for PMSM running under dynamic condition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4534.

- [12] 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.
- [13] URRESTY J, RIBA J, ROMERAL L. Application of the zero-sequence voltage component to detect stator winding inter-turn faults in PMSMs [J]. Electric Power Systems Research, 2012,89: 38.
- [14] LEBOEUF N, BOILEAU T, NAHID-MOBARAKEH B. Fault detection in a current controlled PM drive using back-EMF estimation and residual analysis[C] //2010 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2010.
- [15] ROMERAL L, URRESTY J C, RUIZ J R, et al. Modeling of surface mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,58(5): 1576.
- [16] URRESTY J, RIBA J, ROMERAL L. Diagnosis of interturn faults in PMSMs operating under nonstationary conditions by applying order tracking filtering [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(1): 507.
- [17] HANG J, ZHANG J, CHENG M, et al. Online interturn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine using zero-sequence components [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 6731.

(上接第 65 页)

- [13] 王荣昊,李喆,孙正,等. 基于 FISVDD 与 GRU 的变压器声纹识别技术[J/OL]. 高电压技术, doi:10.13336/j.1003-6520.hve.20211923.
- [14] 孙汉文,李喆,林睿,等. 基于新奇检测的两级电气故障声纹识别算法[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2888.
- [15] 张重远,罗世豪,岳浩天,等. 基于 Mel 时频谱-卷积神经网络的变压器铁心声纹模式识别方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 413.
- [16] 刘云鹏,王博闻,岳浩天,等. 基于 50 Hz 倍频倒谱系数与门控循环单元的变压器偏磁声纹识别[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4681.
- [17] 张玉良,马宏忠,朱昊,等. 基于稀疏深度森林的调相机轻微定子匝间短路故障诊断[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1875.
- [18] 王玉静,王诗达,康守强,等. 基于改进深度森林的滚动轴承剩余寿命预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 5032.
- [19] 李兵洋,肖健梅,王锡淮. 融合邻域粗糙约简与深度森林的电力系统暂态稳定评估[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3245.
- [20] 刘云鹏,王博闻,李欢,等. 结合载纤绕组形变测量法的大型变压器绕组多次短路冲击暂态声纹特征[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 434.
- [21] 刘云鹏,王博闻,周旭东,等. 基于 162 台超、特高压变压器的声纹特征预警阈值划定研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 45.