

一种对永磁同步电机的故障诊断方法

田 静, 杨希勤

(中国人民解放军 91287 部队修船处, 上海 200083)

摘 要: 随着高功率永磁同步电机 (PMSM) 在舰船上应用的日益广泛, 对 PMSM 的故障诊断和处理也日渐重要。PMSM 的可靠运行是整个舰船系统的首要关注之一, 而对 PMSM 的故障诊断是提高系统可靠性的关键。针对 PMSM 的基本数学模型, 提出一种 PMSM 故障诊断方法, 并得出了相应结论。

关键词: 永磁同步电机; 故障诊断; 传感器辨识算法

中图分类号: TM307⁺. 1 TM351 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540 (2009) 08-0045-04

A Fault Diagnosis Method to Power Permanent Magnetic Synchronous Motor

TIAN Jing, YANG Xi-qin

(NO. 91287 Army of PLA, Shanghai 200083, China)

Abstract: As the ever-increasing and spreading usage of high power permanent magnet synchronous motor (PMSM), the reliability of PMSM is getting more and more important in a system, especially in some warship power system. The key factor to improve the reliability is to conduct fault diagnosis to PMSM. The model of PMSM is set up and several fault diagnosis methods are discussed, that is, sensor model and mechanism model have been built up and correspondent conclusion has been given as well as future development.

Key words: permanent magnet synchronous motor; fault diagnosis; sensor model differentiating arithmetic

0 引言

随着新磁性材料钕铁硼的发展, 高功率永磁同步电机 (PMSM) 的应用日趋广泛。例如, 美国海军将 PMSM 列为舰船推进系统最优先的选择之一。舰船装置的健康和安全操作非常重要, 因为任何突发故障或停机都可能导致舰船和人员生命的损失。PMSM 的可靠运行就成为整个舰船系统的首要关注, 而 PMSM 的故障诊断 (FDD) 是提高系统可靠性的关键, 它已成为一个很活跃的研究领域^[1-4]。本文在对 PMSM 的数学模型进行详细分析的基础上, 提出一种基于传感器的故障辨识模型, 并进行了相应的理论分析。

1 PMSM 的数学模型

不计磁饱和, abc 坐标中的三相 PMSM 的电气模型如式 (1) 所示:

$$v_{abc, s} = R_{abc, s} i_{abc, s} + \frac{d\psi_{abc, s}}{dt} \quad (1)$$

在式 (1) 中, $\psi_{abc, s}$ 表示三相的定子磁通。用矩阵来描述三相变量, 即:

$$\begin{cases} v_{abc, s} = [v_{a, s} \quad v_{b, s} \quad v_{c, s}]^T \\ R_{abc, s} = \begin{bmatrix} R_{a, s} & 0 & 0 \\ 0 & R_{b, s} & 0 \\ 0 & 0 & R_{c, s} \end{bmatrix} \\ i_{abc, s} = [i_{a, s} \quad i_{b, s} \quad i_{c, s}]^T \\ \psi_{abc, s} = [\psi_{a, s} \quad \psi_{b, s} \quad \psi_{c, s}]^T \end{cases} \quad (2)$$

对 PMSM, 式 (2) 中的磁链 $\psi_{abc, s}$ 有两个不同的来源: 一个是由定子自感产生的磁链, 另一个是转子侧的永磁磁链 ψ_{mabc} 。因此, 可根据式 (3) 计算:

$$\psi_{abc, s} = L_s i_{abc, s} + \psi_{mabc} \quad (3)$$

式 (3) 中的定子电感 L_s 是一个 3×3 的对称矩阵。对角元素是每个绕组的自感, 非对角元素

是不同相绕组之间的互感。

由于永磁磁链 Ψ_{mabc} 与转子电气角 θ_r 相关,假定定子绕组以相对相位 120 均匀放置,且磁链的分布遵循正弦定则,那么 Ψ_{mabc} 可以表示为式 (4) 所定义的 θ_r 的周期函数。 Ψ_m 为永磁磁链的幅值。

$$\Psi_{\text{mabc}} = \begin{bmatrix} \Psi_{\text{ma}}(\theta_r) \\ \Psi_{\text{mb}}(\theta_r) \\ \Psi_{\text{mc}}(\theta_r) \end{bmatrix} = \Psi_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \sin \left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

现在,电压方程 (1) 可利用式 (3)、(4) 写为

$$\begin{cases} v_{\text{abc},s} = r_{\text{abc},s} i_{\text{abc},s} + L_s \frac{di_{\text{abc},s}}{dt} + \frac{d\Psi_{\text{mabc}}}{dt} \\ \frac{d\Psi_{\text{mabc}}}{dt} = \Psi_m \omega_r \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi \right) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

在式 (5) 中,转子位置角 θ_r 和电气角速度 ω_r 是两个未知的变量,需要在求解方程之前进行计算。为此,引入了 PMSM 的机械动力方程。根据牛顿定律,该机械模型可利用式 (6)、(7) 进行描述:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} n_p \left[T_e - B_m \frac{\omega_r}{n_p} - T_L \right] \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (7)$$

式中: n_p ——电机的极对数;

J ——转子的转动惯量;

B_m ——粘性摩擦系数;

T_e ——电磁转矩;

T_L ——负荷转矩。

PMSM 所产生的电磁转矩 T_e 可由永磁系统的磁场能量 W_c 得出:

$$T_e = n_p \frac{\partial W_c}{\partial \theta_r},$$

$$W_c = \frac{1}{2} (i_{\text{abc},s})^T L_s (i_{\text{abc},s}) + (i_{\text{abc},s})^T \Psi_{\text{mabc}} + W_{\text{PM}} \quad (8)$$

式中, W_{PM} 表示 PMSM 的永磁转子中所存储的能量。将式 (4) 代入式 (8), 转矩可利用相电流

和转子角表示:

$$T_e = n_p \left\{ \frac{1}{2} (i_{\text{abc},s})^T \frac{\partial L_s(i_{\text{abc},s})}{\partial \theta} (i_{\text{abc},s}) + (i_{\text{abc},s})^T \Psi_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi \right) \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

至此, PMSM 的暂态响应可通过求解微分方程 (5) ~ (9) 而得到。

转换到 dq 坐标系后, 按照状态空间矩阵格式, 该模型可写为^[5]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d,r} \\ i_{q,r} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_r & 0 \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega_r & -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{\Psi_m}{L_q} \\ \frac{3P^2}{8J} (L_d - L_q) i_{q,r} & \frac{3P^2}{8J} \Psi_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d,r} \\ i_{q,r} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d,r} \\ v_{q,r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{P}{2J} (T_L + T_f) \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于隐极 PMSM, 其 $L_d = L_q = L_{dq}$, 式 (10) 可简化为式 (11):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{d,r} \\ i_{q,r} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{dq}} & \omega_r & 0 \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_{dq}} & -\frac{\Psi_m}{L_{dq}} \\ 0 & \frac{3P^2}{8J} \Psi_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d,r} \\ i_{q,r} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{dq}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{dq}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d,r} \\ v_{q,r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{P}{2J} (T_L + T_f) \end{bmatrix} \quad (11)$$

dq 模型在 dq 坐标系中描述了一个高度耦合的非线性系统。 $i_{d,r}$ 、 $i_{q,r}$ 和 ω_r 是状态变量, $v_{d,r}$ 和 $v_{q,r}$ 是控制信号 (输入)。在具有平衡三相功率输入的条件下, dq 坐标系中的电压和电流是常量, 这使它成为电机控制和 FDD 中最好的模型。

上述 dq 模型简单, 广泛应用于电机控制器的设计中, 但是许多故障都会造成绕组不对称, dq 模型的基础是帕克变换, 这对于具有非对称绕组的 PMSM 就丧失了其优越性, 例如定子绕组故障情况。为了解决 dq 模型的上述问题, 基于有限元分析 (FEA) 建立的 FDD 模型可在故障情况下对电机性能提供准确的逼近, 但 FEA 需解决大量非线性方程, 因此计算效率不高, 不适用于在线执行。

2 定子绕组故障条件下 PMSM 的数学模型

定子绕组是 PMSM 中最易发生电气故障的地方, 定子绕组故障通常是由同相或不同相线圈之间的绝缘故障引起的。

为了考虑 PMSM 模型中的匝间故障, 受影响的相绕组被分成两部分: 正常部分和短路部分, 图 1 显示了具有匝间短路故障的 PMSM 电路。为了表示故障的类型及其位置, 引入了两个新参数 σ 和 θ_f 。 σ 代表故障类型, 它定义为短路匝数 (N_f) 占总匝数 (N_s) 的比。 θ_f 为故障位置参数, 它是故障相和 a 相轴之间的角度, 因此, θ_f 只能取三个不同的值: 0 、 $2\pi/3$ 或 $-2\pi/3$, 分别对应于 a、b、c 相的定子绕组故障。通过在新电路中用下标 f (故障) 定义电气量, 新的电机电压方程可写为式 (12) 和 (13)。一些量用标志 () 表示它们是在故障条件下的量。

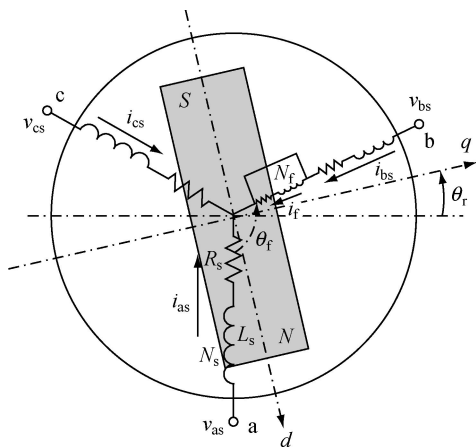


图 1 绕组故障的 PMSM 的电路模型

$$v_{abcf, s} = R_{abcf, s} i_{abcf, s} + \frac{d\psi_{abcf, s}}{dt} \quad (12)$$

$$\begin{cases} v_{abcf, s} = [v_{a, s} & v_{b, s} & v_{c, s} & v_{f, s}]^T, v_{f, s} = 0 \\ R_{abcf, s} = \begin{bmatrix} R_{a, s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{b, s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{c, s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{f, s} \end{bmatrix} \\ i_{abcf, s} = [i_{a, s} & i_{b, s} & i_{c, s} & i_{f, s}]^T \\ \psi_{abcf, s} = [\psi_{a, s} & \psi_{b, s} & \psi_{c, s} & \psi_{f, s}]^T \end{cases} \quad (13)$$

故障相的 PM 磁链可分为两部分: $\psi_{b, s}$ 和 $\psi_{f, s}$, 它们与故障大小参数 σ 成正比。包含故障位置参数 θ_f 时, 正常情况下的磁链方程 (4) 根据永磁所确定的磁链修改为式 (14)。

当内部故障发生时仍应用 (6) ~ (9) 的机械模型, 它们和式 (11) ~ (14) 一起用来描述系统在定子绕组匝间故障下的模型。

$$\begin{aligned} \psi_{mabcf} &= \begin{bmatrix} \psi_{ma}(\theta_r, \theta_f) \\ \psi_{mb}(\theta_r, \theta_f) \\ \psi_{mc}(\theta_r, \theta_f) \\ \psi_{mf}(\theta_r, \theta_f) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \sin(\theta_r - \theta_f) \\ (1 - \sigma) \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} - \theta_f\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} - \theta_f\right) \\ \sigma \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} - \theta_f\right) \end{bmatrix} \quad (14) \end{aligned}$$

3 PMSM 传感器的故障辨识模型

传感器故障辨识算法基于两个假设: (1) 不会有两个传感器同时发生故障; (2) 在传感器发生故障时, 没有任何类型的系统内部故障随之发生。对于一个实际系统而言, 多重故障同时发生的概率很低, 因此这些假设可以接受。

在正常情况下的 PMSM 模型可用式 (10) 中三个不同的方程式来描述, 其中假设 i_d 、 i_q 和 ω_r 可以直接使用传感器测量得到。实际上 i_d 和 i_q 并不是直接测量得到的, 这两个值可以通过对测量得到的相电流 i_{abc} 和转子角坐标 θ_f 使用 Park 变换而计算求得。为了计算简便, 在故障辨识的设计中可选择使用 i_d 和 i_q 信号。

根据式 (10), 系统模型可以重新表示为式

(15)。式 (16)给出了实际信号和测量信号之间的关系。

$$\begin{cases} \frac{di_{d,r}}{dt} = \frac{1}{L_d} [v_{d,r} - R_s i_{d,r} + \omega_r L_q i_{q,r}] \\ \frac{di_{q,r}}{dt} = \frac{1}{L_q} [v_{q,r} - R_s i_{q,r} - \omega_r L_d i_{d,r} - \omega_r \Psi_{mag}] \\ \frac{d\omega_r}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{1}{J} n_p^2 \Psi_{mag} i_{q,r} + \frac{3}{2} \frac{1}{J} n_p^2 (L_d - L_q) i_{q,r} i_{d,r} - \frac{B}{J} \omega_r - n_p \frac{1}{J} T_L \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} y_1 = i_{d,r} + f_d \\ y_2 = i_{q,r} + f_q \\ y_3 = \omega_r + f_\omega \end{cases} \quad (16)$$

在式 (16)中, f_d 、 f_q 和 f_ω 表示传感器故障的严重程度。在此所考虑到的传感器故障特征包括由于传感器故障所引起的信号遗失,以及由于老化所造成的在测信号中的漂移等。传感器故障辨识算法可以基于测量数据 y_1 、 y_2 和 y_3 ,确定传感器上是否存在故障。

4 结 语

利用传感器辨识算法对 PMSM 进行故障诊断,并基于 PMSM 的模型进行了实际应用,验证

了故障诊断建模方法的可行性和有效性。如何进一步完善故障诊断的完整性和可靠性,如何进行算法的建模仿真和实际应用,是下一步要深入思考和研究的方

【参考文献】

- [1] Singh G K, Kazzaz S A. Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research-a survey[J]. Electric Power Systems Research, 2003 (64): 145-158
- [2] Henao H, Razik H, Capolino G A. Analytical approach of the stator current frequency harmonics computation for detection of induction machine rotor faults [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2005 (41): 801-807.
- [3] Dai M, Keyhani A, Sebastian T. Fault analysis of a PM brushless DC Motor using finite element method [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005 (20): 1-6
- [4] Awadallah M A, Morcos M M. Automatic diagnosis and location of open-switch fault in brushless DC motor drives using wavelets and neuro-fuzzy systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006 (21): 104-111.
- [5] 许实章. 新型电机绕组理论与设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002

收稿日期: 2009-03-25

(上接第 44 页)

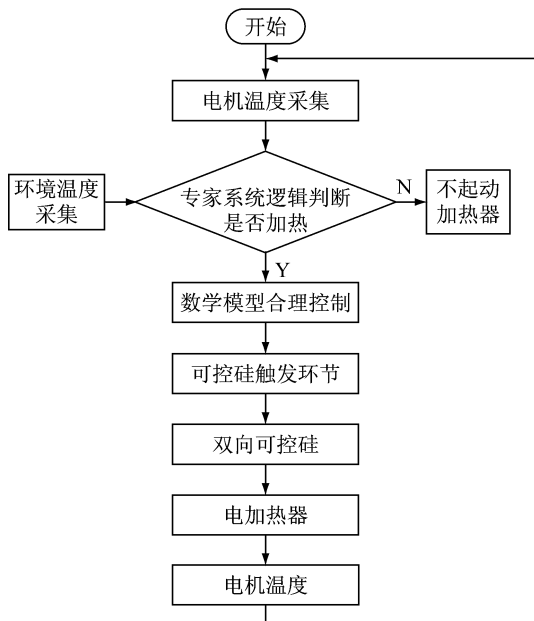


图 2 工作原理图

【参考文献】

- [1] 冯复生. 大型发电机近年来事故原因及防范对策 [J]. 电网技术, 1999, 23 (1): 74-78
- [2] 史进渊, 杨宇, 孙庆. 大型汽轮发电机故障规律的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 24 (15): 16-18
- [3] 张道钢, 曹广恩, 朱松键. 大功率汽轮发电机及其运行 (下册) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1986
- [4] 蒲莹, 史家燕, 罗应立, 等. 发电机故障诊断中不同运行条件下定子绕组温度标准值的确定 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (8): 79-83
- [5] 许伯强, 李和明, 朱凌, 等. 发电机定子绕组温度在线监测新方法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (1): 35-38
- [6] 林飞, 张春朋, 宋文超, 等. 感应电机定子温度监测的一种新方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (3): 58-60
- [7] 李俊卿, 李和明, 董淑惠. 汽轮发电机定子铁心端部温度的在线监测 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (2): 58-61

收稿日期: 2009-05-06