

基于电阻辨识的双三相永磁同步电机驱动系统的故障诊断

张婷 陈兴龙

中国科学院大学中国科学院光电技术研究所 四川成都 610209

摘要: 针对双三相永磁同步电机驱动系统中缺相故障与开关管开路故障的诊断难题, 本文提出一种基于电阻辨识的故障诊断方法。该方法基于自然坐标系下的电机数学模型, 通过电压补偿策略构建通用电阻辨识模型, 实现正常运行与故障状态下的相电阻实时监测。实验结果证实了所提方法在缺相故障和开关管故障诊断的有效性。

关键词: 故障诊断; 双三相永磁同步电机; 开路故障; 电压补偿; 电阻辨识

引言

随着电力电子系统和交通运输行业的发展, 多相电机因其出色的容错能力和高功率输出能力, 逐渐成为许多领域中驱动电机的最热门选择^{[1],[2],[3],[4]}。这些领域包括船舶推进、航空航天、电动汽车等^[5]。

一般来说, 故障诊断方法可以分为基于模型的、基于信号的, 和数据驱动的方法。基于模型的故障诊断方法和基于信号的故障诊断方法具有诊断速度快的特点。然而, 基于模型的故障诊断方法对电机参数的准确性要求较高, 并且存在不同故障之间的故障指标变量耦合现象, 即不同的故障可能共享一些共同特征, 导致误诊风险。基于信号的故障诊断方法严重依赖电机的运行条件, 导致故障诊断的鲁棒性较低。另一方面, 数据驱动的故障诊断方法具有较高的诊断精度, 适用于诊断多种类型的故障, 误诊概率较低。然而, 数据驱动的故障诊断方法依赖大量的实际系统数据进行训练, 算法复杂度较高。

为了寻求更简便计算与快速故障诊断的方法, 本文基于电阻辨识开展了双三相电机驱动系统的故障诊断。

本文的贡献总结如下:

- (1) 根据系统故障后的电流路径分析与中性点电势变化, 建立了电压补偿机制得到了统一的电阻辨识框架。
- (2) 基于电阻辨识的故障诊断方法可以在百微秒级做到故障定位。
- (3) 在不改变控制框架和电机数学模型的情况下, 充分利用系统进行故障诊断。

1 电机建模

本文研究的双三相永磁同步电机驱动系统拓扑由图 1

所示的两电平电压源逆变器供电, 其中两组三相绕组在空间上分布 30 度。

在标准假设下 (忽略磁饱和和铁芯损耗, 假设绕组分布为正弦波), 驱动系统采用表贴式双三相永磁同步电机驱动系统, 因此 d-q 轴电感关系为 $L_d=L_q$ 。静止坐标系下双三相永磁同步电机的模型如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{6s} = \mathbf{R}_{6s} \mathbf{i}_{6s} + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_{6s}}{dt} \\ \boldsymbol{\Psi}_{6s} = \mathbf{L}_{6s} \mathbf{i}_{6s} + \boldsymbol{\psi}_{6s} \end{cases}$$

其中, $\mathbf{u}_{6s}, \mathbf{i}_{6s}$ 和 $\boldsymbol{\Psi}_{6s}$ 分别表示定子相电压、定子相电流和每相定子磁链; $\boldsymbol{\psi}_{6s}$ 为磁链幅值; $\mathbf{R}_{6s}, \mathbf{L}_{6s}$, 和 $\boldsymbol{\lambda}_{6s}$ 分别为电阻、电感和磁链系数矩阵。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{6s} &= [u_a \ u_b \ u_c \ u_d \ u_e \ u_f]^T \\ \mathbf{R}_{6s} &= [R_a \ R_b \ R_c \ R_d \ R_e \ R_f]^T \\ \mathbf{i}_{6s} &= [i_a \ i_b \ i_c \ i_d \ i_e \ i_f]^T \end{aligned}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{6s} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e - \frac{\pi}{6}) \\ \cos(\theta_e - \frac{5\pi}{6}) \\ \cos(\theta_e + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix}$$

2 电阻辨识

静止坐标系下双三相永磁同步电机的数学模型具有高度耦合性。本节详细介绍了健康运行和故障运行统一的电阻辨识框架:

2.1 健康运行下的电阻辨识

双三相永磁同步电机的结构由两组通过隔离中性点组合的三相绕组组成。在系统健康运行时，电流流动平衡，两个隔离中性点的电位保持为 0。在健康运行中，每相的参考电压等于每相的实际电压，如式 (6) 所示。因此，每相电阻可以直接利用双三相永磁同步电机的数学模型进行辨识。通过将静止坐标系下双三相永磁同步电机的数学模型带入 (6)，可以使用数学计算方法得到每相的电阻。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_e \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a^* \\ u_b^* \\ u_c^* \\ u_d^* \\ u_e^* \\ u_f^* \end{bmatrix}$$

2.2 基于电压补偿的电阻辨识

当双三相永磁同步电机驱动系统发生故障时，中性点电位将不再为 0。以 A 相绕组故障为例，包含 A 相绕组的一组绕组的中性点电位将不再保持为 0，电流流动不再平衡，导致施加在正常绕组段的电压发生偏移，引起电流路径的变化，从而在 B 相和 C 相绕组之间形成闭合的电流路径，如图 2 所示。因此，无法直接计算正常绕组段的相电阻，需要进行电压补偿以获得各相的真实电阻。由于是隔离中性点结构，不会影响 DEF 相绕组的中性点电位， O_2 电位保持为 0，DEF 相绕组的电流流动保持平衡，相电压等于参考电压。

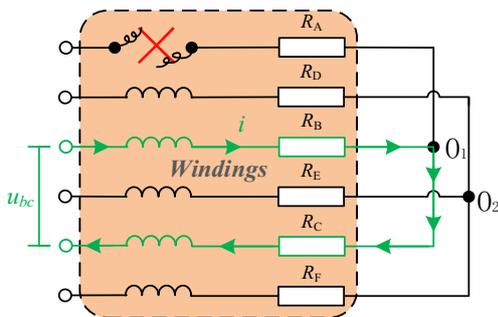


图 2.A 相故障下的电流路径

通过分析从健康运行到故障状态的电流路径变化，在 A 相绕组故障条件下，B 相和 C 相绕组之间形成闭环电流路径，允许计算 B 相和 C 相的电阻之和，但无法单独获得 B 相和 C 相的真实电阻值，如式 (8) 所示。

$$R_b + R_c = \frac{u_{bc}}{i_{bc}} \quad (7)$$

其中， u_{bc} 表示 B 相和 C 相之间形成的电压， i_{bc} 表示流过 B 相和 C 相的电流。

在实际计算中，各相的电阻值直接使用参考电压计算。然而，如前所述，例如当 A 相绕组发生故障时，ABC 相绕组的中性点电位发生变化，导致施加到 B 相和 C 相的实际电压不再等于参考电压，因此通过数学计算直接得到的 B 相和 C 相电阻值并非其真实电阻值，而是计算出的 B 相电阻为正无穷或负无穷，同样，C 相电阻为负无穷或正无穷，但它们的和保持不变，如图 3 所示。

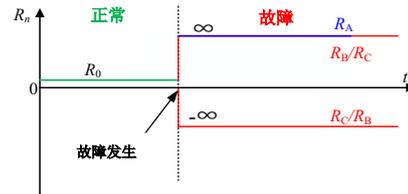


图 3. 中性点电位偏移下 ABC 相电阻变化

由于中性点电位的偏移，无法计算各相的真实电阻。为了获得所有运行条件下各相的真实电阻，首先需要计算中性点电位偏移引起的电压偏移，推导的电压偏差如式 (9) 所示。在电压补偿之前，各相电阻如图 3 所示。由于健康运行时各相电阻为正，因此基于负电阻值的相进行电压补偿，电压补偿后的电压如式 (10) 所示。

$$Au = u_n^* - u_n \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \\ u_e \\ u_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a^* - \Delta u_1 \\ u_b^* - \Delta u_1 \\ u_c^* - \Delta u_1 \\ u_d^* - \Delta u_2 \\ u_e^* - \Delta u_2 \\ u_f^* - \Delta u_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中， u_n^* 表示各相的参考电压， u_n 表示各相的实际电压， u_n' 表示各相电压补偿后的电压， Δu_1 表示 ABC 相绕组的电压偏差， Δu_2 表示 DEF 相绕组的电压偏差。

2.3 采样误差和零偏移处理

电流传感器的采样误差导致采样电流在零附近频繁波动，基于模型的电阻辨识特性可能导致系统参数模型辨识出现误差。为了确保辨识准确，需要对零附近的电流采样误差进行校正，因此本文引入带宽控制器来解决电流采样误差问题，带宽控制器的表达式如式 (11) 所示。

$$i_n = i_n'; \quad i_n' \geq I_{th}, i_n < I_{th} \parallel i_n' \leq -I_{th}, i_n > -I_{th} \quad (10)$$

其中, i_n' 表示前一个采样周期的六相电流, I_{th} 是一个较小的电流阈值。

在电阻辨识过程中, 当电压信号 U_n 过零时, 辨识的电阻被视为 0; 然而, 当电流信号过零时, 得到的电阻值会在正无穷和负无穷之间突然跳变, 这些现象影响电阻值的正常辨识。因此, 需要对电压和电流信号的过零进行处理, 以获得各相的正常电阻值, 电压和电流信号的过零处理如式 (12) 所示。

$$R_n = R_n'; \quad -I_{th} \leq i_n \leq I_{th} \ \& \ -U_{th} \leq u_n \leq U_{th} \quad (10)$$

其中, R_n 表示处理电压和电流信号过零后辨识的电阻, R_n' 表示前一个采样周期辨识的六相电阻值, I_{th} 和 U_{th} 分别表示较小的电流阈值和电压阈值。

3 仿真验证

为验证所提出的针对缺相故障和开关开路故障的故障诊断方法的有效性, 在搭建的仿真平台上进行了实验。缺相故障通过断路器断开相绕组实现, 而开关开路故障则通过禁用特定驱动信号达成。仿真实验主要参数如表 4-1 所示。

表 41 实验参数

名字	数值
极对数	5
直轴电感	4.5mH
交轴电感	4.5mH
永磁磁链	0.038Wb
定子电阻	0.5Ω
额定功率	3kW
额定转速	2000rpm
额定转矩	15N.m
额定电流	12A
开关频率	10kHz

3.1 A 相缺相故障

图 4 和图 5 展示了双三相永磁同步电机驱动系统在 A 相缺相故障下的相电阻变化、相电流变化和 K 值变化。当 A 相发生故障时, A 相电流立即变为 0, 如图 5(b) 所示。此时, A 相电阻增大, 其余相电阻不变, 表征电阻相位的 K 值由 0 变为 1, 表征 A 相发生故障, 如图 5 和 4 所示。A 相电流和 A 相电阻在相同基波周期内发生对应的变化, 且 K 值为 1, 则表明发生 A 相缺相故障。

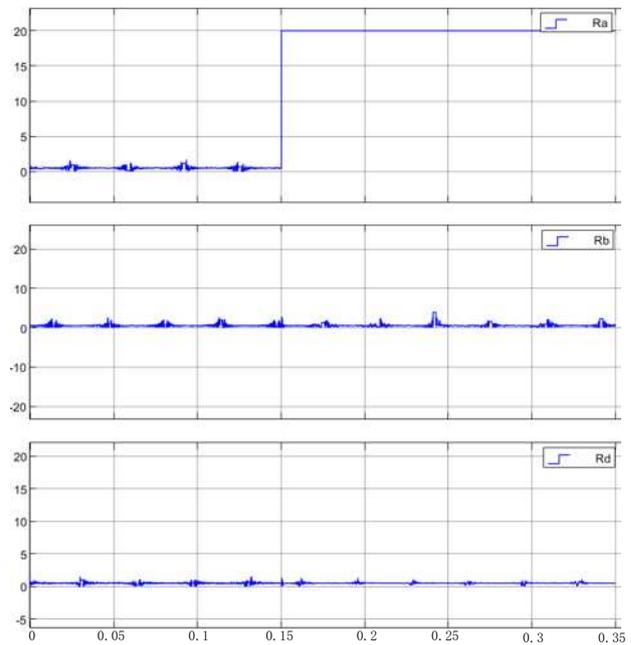


图 4.A 相缺相故障 .(a)A 相电阻 .(b)B 相电阻 .(c)D 相电阻 .

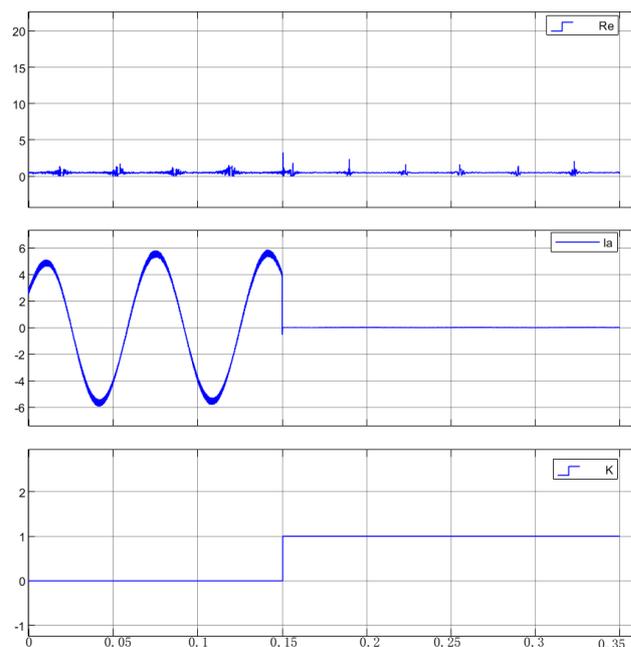


图 5.A 相缺相故障 .(a)E 相电阻 .(b)A 相电流 .(c)K 变化 .

3.2 B 相开关管开路故障

图 6 和图 7 展示了双三相永磁同步电机驱动系统在 B 相开关管故障下的相电阻变化、相电流变化和 K 值变化。当 B 相发生故障时, B 相电流立即变为 0, 如图 5(b) 所示。此时, B 相电阻增大, 其余相电阻不变, 表征电阻相位的 K 值由 0 变为 2, 表征 B 相发生故障, 如图 5 和 4 所示。B 相

电流和 B 相电阻在相同基波周期内发生对应的变化，且 K 值为 2，则表明发生 B 相开关管故障。

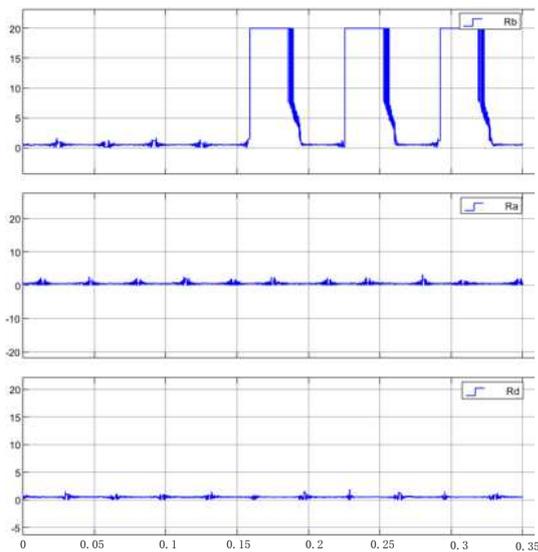


图 6.A 相缺相故障 .(a)E 相电阻 .(b)A 相电流 .(c)K 变化 .

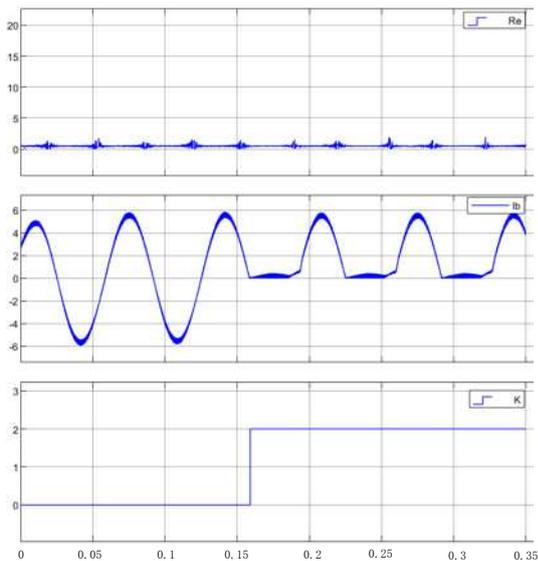


图 7.A 相缺相故障 .(a)E 相电阻 .(b)B 相电流 .(c)K 变化 .

3.3 D 相缺相故障 图 8

4 结论

本文提出的基于电阻辨识的双三相永磁同步电机驱动系统缺相故障与开关管开路故障诊断方法，以电机相电阻为核心故障特征量，通过自然坐标系下的电压补偿策略实现电

阻实时监测，突破了传统诊断方法依赖复杂算法或额外硬件的局限，仅依赖驱动系统原有采样电路即可通过相电阻偏差实现故障类型识别，降低了系统算法复杂度与硬件成本。实验验证其在额定负载下诊断准确率较高，并且能够达到百微妙级别的故障定位，半个基波周期内的实现故障诊断，为双三相永磁同步驱动系统的可靠性运行提供了无需额外传感器且抗干扰能力强的实用解决方案。

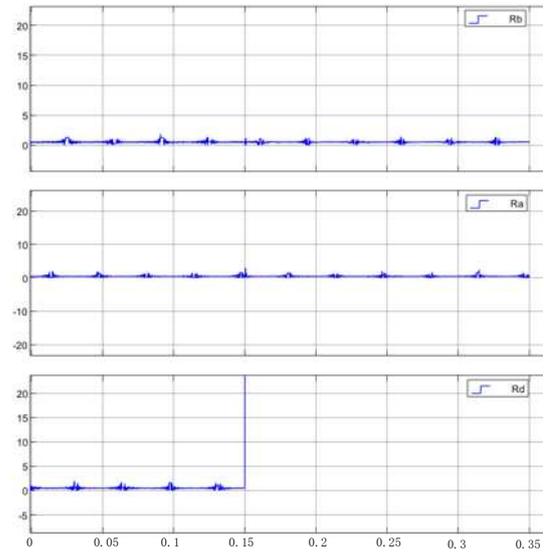


图 8.A 相缺相故障 .(a)E 相电阻 .(b)B 相电流 .(c)K 变化 .

参考文献:

- [1] 龙齐杰, 胡亮灯, 鲁斌, 等. 考虑多相电机高频振动抑制的三电平 H 桥变频器中性线电流异常增加问题分析及抑制研究 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15[2025-05-29].
- [2] 石行蕴, 吕昕阳, 包木建, 等. 多相永磁同步电机匝间短路故障温度场计算 [J]. 大电机技术, 2025,(01):1-6+13.
- [3] 易佳力. 基于零序电流调节的多相永磁电机开路故障容错控制策略研究 [D]. 浙江大学, 2024.
- [4] 顾明海. 基于深度学习的电机故障检测技术专利综述 [J]. 防爆电机, 2024,59(06):99-102.
- [5] 鲁斌, 胡亮灯, 裘呈熠, 等. 面向舰船推进的中压新型三电平多相 H 桥变频器共模电压抑制策略研究 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15[2025-05-29].