

多相电机容错控制策略综述

贾少锋^{1,2}, 刘紫薇^{1,2}, 梁得亮^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为客观全面地反映目前多相电机容错控制领域的研究进展,使其在风力发电、船舶推进、轨道交通与航空航天等大功率及可靠性要求高的应用场合展现出更好的应用潜力,本文系统深入地对国内外相关研究进行了分析,总结了多相电机的故障后稳态分析方法,详细论述了多相电机故障后容错参考电流的生成方法,包括基于故障前后磁动势不变的容错控制策略和基于故障瞬间转矩不变的容错控制策略;介绍了容错电流的优化及跟踪方法,并介绍了直接转矩控制与模型预测控制在多相电机容错控制策略中的应用;讨论了上述各种控制方法的优缺点;最后对上述控制技术进行了总结与展望,分析了多相电机容错控制技术的发展趋势,对多相电机及容错控制的发展及后续研究提供参考。

关键词: 容错控制; 多相电机; 电机故障; 磁动势

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202106021 **文章编号:** 0253-987X(2021)06-0176-09



OSID 码

Review of Fault-Tolerant Control Strategies for Multiphase Machines

JIA Shaofeng^{1,2}, LIU Ziwei^{1,2}, LIANG Deliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To objectively and comprehensively reflect the current research progress in the field of fault-tolerant control for multiphase machines and show better utilization potentiality of the control in high-power and high-reliability applications such as wind power generation, ship propulsion, rail transportation, and aerospace, related researches of fault tolerant control are analyzed, the post-fault steady-state analysis methods of multiphase machines are summarized, and the generation methods of the post-fault fault-tolerant reference current of multiphase machines are discussed in detail, including the fault-tolerant strategy based on invariant torque and the fault-tolerant strategy based on invariant magnetomotive force. The optimization methods and tracking methods of fault-tolerant current are introduced. The applications of direct torque control (DTC) and model predictive control (MPC) in fault-tolerant control strategy of multiphase machine are also introduced. The advantages and disadvantages of each control method are discussed. Finally, the above control technologies are summarized and prospected, and the development trend of fault-tolerant control technology for multiphase machine is analyzed, which may serve as reference for the development and follow-up research of multiphase

收稿日期: 2020-12-09。 作者简介: 贾少锋(1989—),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807153,51737010);陕西省自然科学基金资助项目(2020JQ-051)。

网络出版时间: 2021-04-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210402.1115.002.html>

machine and fault-tolerant control.

Keywords: fault-tolerant control; multi-phase machine; electric machine fault; magnetomotive force

三相电机广泛应用于各种生产活动。但在极端工况下,三相电机出现缺相故障后,电动机空间中的磁场分布将发生畸变,使电机停转,从而威胁系统安全。相较于三相电机,多相电机绕组相数更多,增加了自由度,因而不需改变逆变器的结构,只需改变控制策略,便可使多相电机在故障条件下安全运行,可见,多相电机的容错性能更佳。此外多相电机具有转矩波动幅值小、低电压下可提供大功率等优点。

多相电机的诸多优点使其广泛应用于航空航天、舰船推进、电力牵引等领域^[1-3]。作为电力推动装置中的核心部件,电机的可靠性是执行各类工业任务的前提。在复杂的工况下,电机系统可能会发生故障,需要采取合适的容错控制策略使电机在故障条件下仍能正常运行,这对系统的安全性至关重要。1980 年,电机可靠性领域的开拓者 Slijka 报道了容错控制策略的相关成果^[4]。此后,容错控制成为自动控制学术论坛中的关键议题^[5]。

电机系统故障类型见图 1。可以看出,多相电机驱动系统中常见的故障可大致分为三类:电机绕组故障、功率变换器故障、传感器故障。其中,传感器故障主要包括位置传感器故障、电流传感器故障与电压传感器故障,这些故障可通过维修或者传感器冗余进行解决;电机绕组故障主要包括绕组开路故障、匝间短路故障,其中绕组开路故障较为常见;功率变换器故障是电机系统中最常发生的故障,可分为功率开关管的直通故障和断路故障。发生直通故障时,可通过串联熔断器将故障相从系统中切除,从而将直通故障转换为断路故障。故在电机系统可能发生的故障中,缺相故障占大多数,因此,国内外学者对电机系统缺相故障容错控制策略研究较多,对短路故障研究较少。

与三相电机相比,多相电机具有更高自由度。当电机发生故障时,可通过对剩余健康相电流进行重构^[6],即利用不同的原则对容错参考电流进行计算,随即选择合适的电流控制器进行电流跟踪,使故障后电机系统的转矩实现平滑输出,从而减少故障对系统的影响。本文通过对近年的多相电机容错控制研究进行分析,对多相电机故障后的稳态分析方法进行了简要介绍;分析了目前多相电机容错控制策略,主要分类及内容见图 2;介绍了容错参考电流

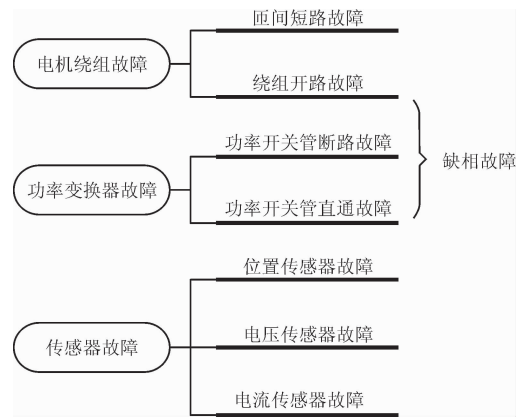


图 1 电机系统故障类型

Fig. 1 Classification of electric machine system faults

的优化约束方法;讨论了各电流跟踪控制算法的优缺点,简要介绍了电机故障条件下的直接转矩控制及两种矢量解耦方法;最后对容错控制技术的应用前景进行了展望。

1 多相电机故障后的稳态分析方法

多相电机故障后的稳态分析方法主要包括相坐标法、多回路法、对称分量分析法、电磁场有限元分析法。其中,由于相坐标法求解过程十分复杂,故较少采用此方法对电机故障进行研究^[7];多回路分析法全面考虑绕组的空间排布、连接方式及气隙磁场的空间谐波等因素,故准确性和通用性较好^[8-9];对称分量分析法将发生缺相故障的多相电机的剩余正常相绕组不对称电流分成正序、负序和零序电流分别进行计算,再将对应的结果进行叠加,进而得到相分量。电磁场有限元分析方法的基本思想是将问题的求解域划分为有限个互不重叠的单元,单元之间仅靠节点连接,整个求解域内的解可以看作是由所有单元上的近似解构成^[10]。有限元分析方法的计算过程耗时较长,物理概念较不清晰。

电机发生故障后,对故障进行分析并计算电机各工况下的电磁特性是一个重要的环节,这为容错控制策略的制定提供了基础。

2 多相电机容错电流重构原则

为了保证电机故障后的合理运行,常用的方法是重新控制剩余的健康相电流。目前,已有许多学

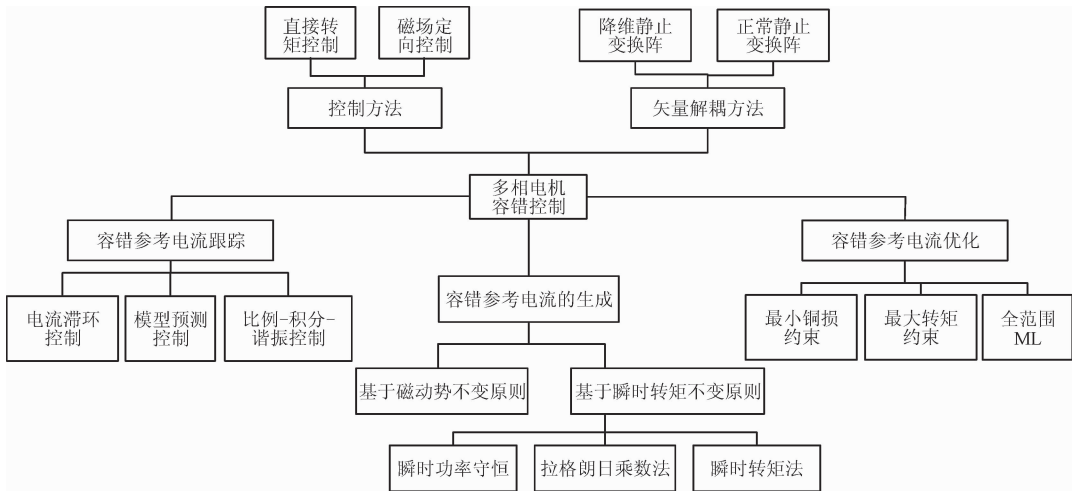


图2 多相电机容错控制策略

Fig. 2 Fault-tolerant control strategy for multiphase machines

者根据不同的原则与约束条件对故障后的参考电流进行了推导。常见的原则包括故障前后磁动势不变原则和故障瞬间转矩不变原则。

2.1 故障前后磁动势不变原则

Lipo 针对奇数相电机和偶数相电机,基于磁动势不变原则,推导了由于逆变器中某一支的晶体管的断路,或是电机一相绕组断路造成的单相断路故障发生后,各健康相电流的容错表达式,为后续的研究奠定了良好的理论基础^[11]。赵文祥等研究了五相容错式磁通切换电机容错控制策略,建立了磁动势方程,推导出单相和双相故障时的容错控制策略。该电机在容错状态下保持了较好的转矩性能,具有较好的静态性能^[12]。吴一丰等提出了一种六相永磁磁通切换电机,该电机有良好的功率和转矩特性,同时可以在故障时实现故障相的隔离和短路电流的抑制。针对缺相故障提出了一种基于磁动势不变原则的容错电流优化方法,在降低故障后转矩脉动的同时,优化了转矩铜损比,同时针对短路故障提出了一种故障的分解补偿策略,避免了在线计算带来的复杂性,结果体现了该策略在两种故障状态下均有良好的容错特性^[13]。

以下阐述电机故障后基于磁动势不变的健康相容错电流计算过程,以五相电机为例,磁动势为

$$F_m = kN_s I_A + aN_s I_B + a^2 N_s I_C + a^3 N_s I_D + a^4 N_s I_E \quad (1)$$

式中: a 为旋转因子, $a = e^{j\frac{2\pi}{5}}$; k 为常数,与电机极对数及绕组系数有关; N_s 为相绕组匝数; I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D 、 I_E 分别为 A、B、C、D、E 绕组中通过的电流。经整理,磁动势可以表达为

$$F_m = \frac{5kN_s I}{2} e^{j\theta} \quad (2)$$

式中: I 为相电流有效值; θ 为相角, $\theta = \omega t + \phi$, ϕ 为初相角; ω 为电源角频率; j 为虚数单位。

假设 A 相绕组发生开路故障,则式(2)中磁动势的实部和虚部分别表示为

$$\frac{5kN_s I}{2} \cos\theta = kN_s (I'_B + I'_E) \cos 72^\circ - kN_s (I'_C + I'_D) \cos 36^\circ \quad (3)$$

$$\frac{5kN_s I}{2} \sin\theta = kN_s (I'_B - I'_E) \sin 72^\circ + kN_s (I'_C - I'_D) \sin 36^\circ \quad (4)$$

式中: I'_B 、 I'_C 、 I'_D 、 I'_E 为故障后 B、C、D、E 相电流。

为了减少式(3)、式(4)的两个自由度,设

$$\left. \begin{aligned} I'_B &= -I'_D \\ I'_C &= -I'_E \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从而得到故障前后的相电流矢量变化如图 3 所示,故障后健康相的各电流为

$$I'_B = -I'_D = \frac{5I}{4} \left(\frac{\sin\theta}{\sin 72^\circ + \sin 36^\circ} + \frac{\cos\theta}{\cos 72^\circ + \cos 36^\circ} \right) = 1.38 I \cos(\omega t + \phi - 36^\circ) \quad (6)$$

$$I'_C = -I'_E = \frac{5I}{4} \left(\frac{\sin\theta}{\sin 72^\circ + \sin 36^\circ} - \frac{\cos\theta}{\cos 72^\circ + \cos 36^\circ} \right) = 1.38 I \cos(\omega t + \phi - 144^\circ) \quad (7)$$

需要说明的是,对于绕组分布不同的电机,基于故障前后磁动势不变的容错控制策略控制效果差别较大,该策略不适用于绕组非正弦分布的电机。

2.2 故障瞬时转矩不变原则

除了保持故障前后磁动势不变的原则求解容错

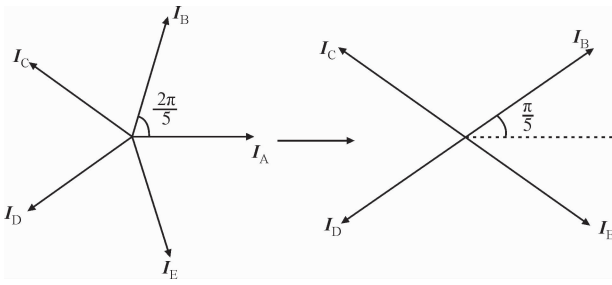


图3 故障前后相电流矢量变化

Fig. 3 Phase current vector before and after fault

参考电流外,还可根据故障瞬间转矩不变进行容错参考电流的求解,即存在3个约束条件:故障前后电机输出转矩保持不变,故障相电流为零,剩余健康相电流之和为零。

2.2.1 拉格朗日乘数法 利用拉格朗日乘数法可以在约束域内对目标函数进行最优解的求取。该方法可运用于不同绕组结构的五相永磁同步电机的^[14-15]。文献[14]针对五相永磁电机驱动系统的开路故障,提出了一种广义最优容错控制方法。该方法以开路故障下转矩不变为目标,考虑了星形接线的单相、双相故障、五边形和五角星接线的三相故障,同时实现了铜耗最小。该方法的目标函数为

$$f(p_1, p_2, i) = \frac{1}{2} i^T i + p_1 (T_{\text{ref}} - k^T i) + p_2 F^T i \quad (8)$$

式中: $p_1(i)$ 、 $p_2(i)$ 为拉格朗日算子,需要说明的是, p_1 是标量, p_2 是矢量; i 为相电流矩阵; k 为反电动势矩阵; F 为表示电机故障类型的故障矩阵。式(8)右边表示最优控制需满足铜耗最小、转矩脉动最小、代表相电流和为零的约束条件。

对目标函数进行求导,可得

$$i = p_1 k - F p_2^T \quad (9)$$

从式(8)(9)可求解出拉格朗日算子

$$p_1 = \frac{T_{\text{ref}}}{k^T F' k} \quad (10)$$

$$p_2^T = p_1 F_{\text{left}}^{-1} k \quad (11)$$

其中 F_{left}^{-1} 、 F' 的定义为

$$F_{\text{left}}^{-1} = (F^T F)^{-1} F^T \quad (12)$$

$$F' = (I_5 - F F_{\text{left}}^{-1}) \quad (13)$$

由式(5)可以求得容错电流为

$$i = \frac{T_{\text{ref}}}{k^T F' k} F' k \quad (14)$$

采取拉格朗日乘数法求解容错电流,可以根据性能需求选择相应的约束条件。但是该方法运算过程复杂,对于被控电机的参数依赖性较强,且不能保证全局最优解。

2.2.2 瞬时转矩法 文献[16]考虑了反电动势中二次谐波对电机转矩的影响,基于瞬时转矩不变的原则讨论了一相开路故障和短路故障的容错控制策略。由各相反电动势和电流乘积之和与电机旋转角速度的比值得到故障瞬间转矩表达式,根据故障前后的转矩平均值不变及转矩波动为零为原则,计算出故障下的容错电流,从而实现故障后转矩脉动最小的控制性能。在短路故障发生时,采用短路故障分解法,可避免复杂的在线计算。

2.2.3 瞬时功率守恒 2008年,美国的 Parsa 等学者基于瞬时功率平衡理论,针对绕组开路故障这一最常见的电机运行故障,提出了一种五相永磁电机的容错控制策略。该控制策略在瞬时功率平衡理论的基础上,根据定子铜损最小和输出转矩脉动最小的约束条件,推导并计算了 n 相永磁电机最优的容错电流,并利用实验验证了该方法的可行性,该方法由于其非迭代的特点,避免了大量计算^[17]。

文献[18]针对多相电机多种故障的容错控制策略展开了讨论,包括短路故障、缺相故障以及缺相和短路相结合的故障,其中一相开路时其对相开路对系统的安全性影响非常大;基于功率守恒原则,利用相量法分析了电机的转矩脉动,从而提出了一种容错电流优化策略;实验表明,利用该容错控制策略在以上3种故障情况下,转矩脉动的标幺值分别为0.210、0.242、0.341,实现了系统的强容错性能。杨贵杰教授课题组根据瞬时功率守恒原理,提出了转矩脉动最小的容错控制策略,从最大输出转矩和最大转矩电流比两个方面进行了控制策略的优化^[19]。其分析过程如下。

根据瞬时功率平衡原则,各相反电动势与相电流乘积与输出功率相等,其表达式为

$$P = T_e \omega = e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C + e_D i_D + e_E i_E = 2.5 E_{m1} I_{m1} + 2.5 E_{m3} I_{m3} \quad (15)$$

式中: I_{m1} 、 I_{m3} 分别为相电流基波幅值与三次谐波幅值; E_{m1} 、 E_{m3} 分别为相反电动势基波幅值与三次谐波幅值。

当A相缺相时,瞬时功率

$$P' = T_e' \omega = e_B i_B + e_C i_C + e_D i_D + e_E i_E = 2 E_{m1} I_{m1} + 2 E_{m3} I_{m3} - 0.5 E_{m1} I_{m1} \cos(2\omega t) - 0.5 E_{m3} I_{m3} \cos(6\omega t) - 0.5 (E_{m1} I_{m3} + E_{m3} I_{m1}) [\cos(4\omega t) + \cos(2\omega t)] \quad (16)$$

为了提高故障后电机的输出转矩,设定缺相故障发生于五相永磁电机的定子A相绕组,其故障后电流为0,其余正常相电流的基波和三次谐波分量

保持幅值相等,且呈对称分布,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} i'_A &= 0 \\ i'_B &= I'_{m1} \cos(\omega t - \theta_{11}) + I'_{m3} \cos(3\omega t - \theta_{31}) \\ i'_C &= I'_{m1} \cos(\omega t - \theta_{12}) + I'_{m3} \cos(3\omega t - \theta_{32}) \\ i'_D &= I'_{m1} \cos(\omega t + \theta_{12}) + I'_{m3} \cos(3\omega t + \theta_{32}) \\ i'_E &= I'_{m1} \cos(\omega t + \theta_{11}) + I'_{m3} \cos(3\omega t + \theta_{31}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $\theta_{11} = 36^\circ$; $\theta_{12} = 144^\circ$; $I'_{m1} = 1.382I_{m1}$; $\theta_{31} = 108^\circ$; $\theta_{32} = 72^\circ$; $I'_{m3} = 3.618I_{m3}$ 。此时输出的脉动转矩

$$T_e'' = \frac{1}{\omega} \left[(1.118E_m I'_{m3} - 0.691E_{m3} I'_{m1}) \cos(2\omega t) - (1.809E_{m1} I'_{m3} + 1.118E_{m3} I'_{m1}) \cos(4\omega t) \right] \quad (18)$$

根据故障后脉动转矩为零的原则,得容错电流

$$\left. \begin{aligned} i'_A &= 0 \\ i'_B &= I'_{m1} \cos(\omega t - \theta_{11}) + I'_{m3} \cos(3\omega t - \theta_{31}) \\ i'_C &= I'_{m1} \cos(\omega t - \theta_{12}) + I'_{m3} \cos(3\omega t - \theta_{32}) \\ i'_D &= I'_{m1} \cos(\omega t + \theta_{12}) + I'_{m3} \cos(3\omega t + \theta_{32}) \\ i'_E &= I'_{m1} \cos(\omega t + \theta_{11}) + I'_{m3} \cos(3\omega t + \theta_{31}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: $\theta_{11} = 36^\circ$; $\theta_{12} = 144^\circ$; $\theta_{31} = 18^\circ$; $\theta_{32} = 44.28^\circ$; $I'_{m31} = 1.176I_{m3}$; $I'_{m32} = 1.561I_{m3}$; $I'_{m1} = 1.382I_{m1}$; $I_{m3} = I_{m1} E_{m3} / E_m$ 。

3 容错电流优化约束方法

故障后的补偿电流求解是一个多解问题,可以通过添加约束得到唯一解。为了在某一方面取得最佳性能,可根据不同的优化约束重新生成剩余的电流参考信号,如最小铜损耗(ML)约束和最大转矩(MT)约束。

3.1 最小铜损(ML)约束

在开相故障期间,需要调整电流参考值,以提供无波纹的扭矩,这可能导致故障后相电流比额定电流大,产生过热。如果故障后运行时间延长,则绝缘性能恶化。为了不损坏驱动器,需要限制故障后的相电流以保证电机故障后的合理运行。常用的方法是在保持故障前后磁动势不变的原则之上,加入最小铜损约束,从而求解故障后健康相的电流。

文献[17]针对 n 相永磁电机提出了 ML 策略,其中优化问题采用拉格朗日乘子法求解,目标函数的目的是使损耗最小化。但是以最小定子铜耗(ML)为约束条件生成的参考电流存在幅值不相等的问题,从而限制了输出转矩,即无法输出最大转矩。

3.2 最大转矩(MT)约束

利用 MT 策略,可以在故障后获得最宽的速度运行范围,但同时以较高的铜损耗为代价。文献

[20]和[21]提出了多相感应电机的 MT 策略,采用最大输出转矩原则进行电流优化计算,得到相等的相电流基波有效值。

3.3 全范围 ML(FRML)约束

最小铜损约束与最大转矩约束的主要缺点是,没有实现整个转矩范围的最小定子绕组损耗。由于焦耳损耗是电机的主要损耗类型之一,因此开发一种在转矩运行范围内最大化驱动效率的策略很重要。近几年,有学者提出全范围 ML(FRML)标准,其是 ML 和 MT 标准之间的混合 MLMT 组合^[22-23]。该方法综合了 ML、MT 的优点,即在每一个参考转矩下保证最小铜损。

文献[23]针对单相开路故障情况下,绕组呈正弦分布的多相电机,提出了一种全范围最小损耗(FRML)故障后的容错控制策略,使整个电机的损耗最小,并且利用 FRML 策略对不同类型、不同相数、不同绕组结构的电机进行控制。

4 容错电流跟踪控制方法

对电机进行容错控制主要有两部分,第一是按照优化的需求得到健康相的参考电流,第二是对参考电流进行跟踪。基于磁动势不变原则及利用 ML、MT 约束条件可求解出故障后的参考电流,若要实现容错控制还需要对其进行跟踪。需要跟踪的容错电流可以是直流电流或交流电流。跟踪交流信号避免了转子位置测量带来的安装及可靠性问题,且不需要使用解耦矩阵,减少了计算量。大多数研究利用电流滞环控制方法跟踪交流参考电流。滞环控制可分为两类,即同步开关法与滞环宽度控制法。同步开关法是在每一个等间距的采样时间点上将电流给定值 i_x^* 与测量值 i_x 进行比较。若 $i_x > i_x^*$,则逆变器上桥臂导通;若 $i_x < i_x^*$,则逆变器下桥臂导通,此方法的采样周期固定。如图 4 所示,滞环宽度控制法的原理是将电流给定值 i_x^* 与测量值 i_x 进行比较,若两者之差大于滞环宽度的一半,则改变逆变器上下桥臂 VT₁、VT₄ 的导通状态,从而改变输出电压的极性,最终产生与参考电流差在半个环宽之内的锯齿状电流波形。图中 VD₁、VD₄ 为续流二极管。

文献[24-25]采用电流滞环控制,但这些控制器存在开关损耗大、电流纹波大、开关频率不固定导致电磁兼容问题等缺点。

比例积分谐振(PIR)控制是一种跟踪交流参考信号的有效控制策略,理论上 PR 控制器可实现交流信号的无静差跟踪控制。文献[26]将 PR 控制器

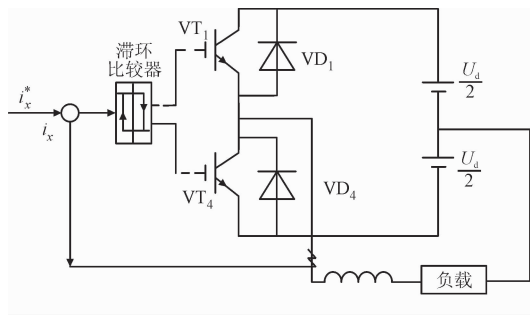


图 4 滞环宽度控制法原理图

Fig. 4 Principle of hysteresis width control method

引入五相感应电机的控制器中,在相坐标系下对交流信号实现了动态跟踪。文献[27]将 PR 控制算法推广到九相异步电机中,具有良好的暂态、稳态性能。

此外,磁场定向控制、直接转矩控制及模型预测控制需要以直流量为参考量。磁场定向控制策略基于空间矢量原理和解耦矩阵,可实现良好的转矩控制特性^[28-38]。当出现缺相故障时,实现解耦矢量控制的方法主要有两种。第一种为使用故障前的变换矩阵,即正常的解耦变换矩阵^[28]。这种方法应用于电流控制时较为简单,且故障情况下的模型与故障前相同,稳态 $\alpha\beta$ 电流参考值保持圆形。然而,该方法应用于电压控制时,由于 A 相存在反电动势,故将增加控制策略的复杂度。第二种为使用降阶解耦变换矩阵,避免涉及故障相的电压电流^[30-39]。文献[36-37]使用了降阶变换矩阵,其中,变换矩阵保留了正交性,然而造成了模型的不对称性,稳态 $\alpha\beta$ 参考电流变为椭圆形,模型参数也随时间变化。针对上述问题,文献[38]采用一种针对五相电机的非正交降阶解耦变换矩阵,如式(20)所示,可以实现故障后情况下的模型与故障前相同,稳态 $\alpha\beta$ 电流参考值保持圆形。解耦矢量控制方案计算量小,无需跟踪交变量,通过控制谐波空间分量可以使电机绕组流过与理论计算一致的容错电流。

$$[T_4] =$$

$$\frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos\theta - 1 & \cos(2\theta) - 1 & \cos(3\theta) - 1 & \cos(4\theta) - 1 \\ \sin\theta & \sin(2\theta) & \sin(3\theta) & \sin(4\theta) \\ \sin(2\theta) & \sin(4\theta) & \sin(6\theta) & \sin(8\theta) \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

除了磁场定向控制之外,直接转矩控制同样具有良好的控制性能。相比磁场定向控制,直接转矩控制策略可直接在定子静止坐标下建立控制算法模型,基本不需要位置传感器,提高了驱动系统的可靠性。文献[39-40]将用于五相感应电机正常运行状

态下的直接转矩控制方法推广到缺相故障运行状态中。此外,文献[41-43]中也提出了基于直接转矩控制的感应电机容错控制策略。但上述研究都集中于感应电机,关于多相永磁同步电动机容错直接转矩控制的文献较少。

近年来,模型预测控制策略被推广到多相电机的容错控制中^[44-47]。模型预测控制是一种依赖于电机模型的控制策略,可根据当前采样时刻的状态预测下一时刻的输出状态,且可以通过代价函数实现电机控制系统的多目标优化。文献[46]提出在不改变控制结构的情况下,在电机故障后,仍可使用故障前的模型预测控制方法,结果表明电机故障前后的过渡较为平稳,性能下降程度较小。相较于 PR 控制策略,模型预测控制虽然动态性能较好,但是会带来较高的谐波分量。

当模型预测控制策略应用于多相电机驱动系统时,由于开关状态的增加而产生了巨大的计算负担。为了减少计算量,有研究提出电压矢量预选技术^[48-49]。其基本思想是根据所需电压基准信息预先选择合适的电压矢量,以减少候选电压矢量的数量。

在磁场定向控制策略、直接转矩控制策略、模型预测控制策略中,通常用 PI 控制器^[50-51]、滑模控制器^[52]对直流量进行跟踪。不论采用何种控制方式,目的都是跟踪容错电流。因此,当多相电机系统发生故障后,如何使控制策略的过渡状态更加平稳,是一个值得研究的问题。

5 总结与展望

本文主要对多相电机故障后的分析方法及容错控制策略进行介绍和归纳。在本文中介绍的故障分析方法有相坐标法、多回路分析法、对称分量分析法及电磁场有限元分析法。电机故障后的容错控制策略的核心是重新计算剩余相的容错电流并进行跟踪。本文对多相电机故障后容错参考电流的生成、优化及控制方法进行了综述。根据遵循的原则、约束,容错电流的计算方法主要分为基于故障前后磁动势不变原则和瞬时转矩不变原则的容错控制策略。目前跟踪容错参考电流的方法主要有电流滞环控制、比例积分谐振控制、解耦矢量控制。此外,文中对直接转矩控制和模型预测控制进行了简单介绍。

目前的大部分研究通常采用增加电机相数来提高电机的容错性能,故障后电机的转矩性能也有所降低。而磁场调制电机、多重电磁转矩磁阻电机等

在运行时含有多重电磁转矩分量,转矩密度大,因此研究转矩性能优良的新型强容错电机的容错电流重构策略同样具有重要意义;在各类电机故障中,电机缺相故障更为高发,故关于电机缺相故障下的容错控制研究较多,电机短路故障下的容错控制研究较少,短路故障的软硬件隔离措施及短路至开路故障的转换方式还有待发掘,多相电机故障前后的无扰切换也是未来值得研究的方向。此外,目前研究主要考虑电机侧铜耗的最优电流重构,实际应用还缺乏考虑变换器和电机侧铁耗的电流分析和研究。

参考文献:

- [1] 朱建光. 六相永磁同步电动机驱动控制系统的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010: 1-7.
- [2] PARSA L, GOODARZI A, TOLIYAT H A. Five-phase interior permanent magnet motor for hybrid electric vehicle application [C]//2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 631-637.
- [3] PARASA L, TOLIYAT H. A Five-phase permanent magnet motor drives for ship propulsion applications [C]//Proceedings of IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 371-378.
- [4] ŠILJAK D D. Reliable control using multiple control systems [J]. International Journal of Control, 1980, 31(2): 303-329.
- [5] 郑应平. 控制科学面临的挑战: 专家意见综述 [J]. 控制理论与应用, 1987(3): 1-9.
ZHENG Yingping. Challenges to control: A collective view [J]. Control Theory & Applications, 1987(3): 1-9.
- [6] XIONG Cong, XU Haiping, GUAN Tao, et al. Fault-tolerant FOC for five-phase SPMSM with non-sinusoidal back EMF [J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(11): 1734-1742.
- [7] TOLIYAT H A, LIPO T A. Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(2): 241-247.
- [8] 王祥珩, 孙宇光, 桂林, 等. 发电机内部故障分析软件的理论基础: 多回路分析法 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2003(4): 72-78.
WANG Xiangheng, SUN Yuguang, GUI Lin, et al. A theoretical basis for generator internal fault analysis software-multi-loop analysis method [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2003(4): 72-78.
- [9] 李俊卿, 任彦珍, 王栋. 双馈感应电机的多回路数学模型及其电感参数的计算 [J]. 大电机技术, 2013(6): 5-10.
LI Junqing, REN Yanzhen, WANG Dong. Multi-loop mathematical model and calculation of inductances in doubly fed induction generation [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2013(6): 5-10.
- [10] 张立霞. 电磁场有限元分析中并行计算的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2006: 6-10.
- [11] JEN-REN F, LIPO T A. Disturbance-free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(5): 1267-74.
- [12] 赵文祥, 唐建勋, 吉敬华, 等. 五相容错式磁通切换永磁电机及其控制 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1229-1236.
ZHAO Wenxiang, TANG Jianxun, JI Jinghua. Topology and control of five-phase fault-tolerant flux-switching permanent-magnet motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1229-1236.
- [13] 吴一丰, 邓智泉, 王宇, 等. 六相永磁容错磁通切换电机及其单相故障的容错控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 71-79, 106.
WU Yifeng, DENG Zhiquan, WANG Yu, et al. Six-phase fault-tolerant flux switching permanent magnet motor and control strategy for single-phase fault condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 71-79, 106.
- [14] MOHAMMADPOUR A, SADEGHI S, PARSA L. A generalized fault-tolerant control strategy for five-phase PM motor drives considering star, pentagon, and pentacle connections of stator windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 63-75.
- [15] MOHAMMADPOUR A, PARSA L. Global fault-tolerant control technique for multiphase permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 178-186.
- [16] 谢德娥, 王宇, 邓智泉. 考虑反电动势 2 次谐波的容错型磁通切换电机开路及短路故障控制策略 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 130-138.
XIE De'e, WANG Yu, DENG Zhiquan. Fault-tolerant control strategy for fault tolerant flux-switching motor with one phase open or short considering second harmonic back-electromotive force [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 130-138.
- [17] DWARI S, PARSA L. An optimal control technique

- for multiphase PM machines under open-circuit faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1988-1995.
- [18] 郝振洋, 胡育文, 黄文新, 等. 永磁容错电机最优电流直接控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 46-51.
- HAO Zhenyang, HU Yuwen, HUANG Wenxin, et al. Optimal current direct control strategy for fault tolerant permanent magnet motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 46-51.
- [19] 高宏伟, 杨贵杰. 五相永磁同步电机缺相运行的建模与控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 93-101.
- GAO Hongwei, YANG Guijie. Modeling and control of five-phase permanent magnet synchronous motor with one phase open-circuit fault [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 93-101.
- [20] ARAFAT A, CHOI S. Fault tolerant control of five-phase permanent magnet assisted synchronous reluctance motor based on dynamic current phase advance [C]// Energy Conversion Congress & Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1208-1214.
- [21] ARASHLOO R S, ROMERAL MARTINEZ J L, SALEHIFAR M, et al. Genetic algorithm-based output power optimization of fault tolerant five-phase brushless direct current drives applicable for electrical and hybrid electrical vehicles [J]. IET Electric Power Applications, 2014, 8(7): 267-277.
- [22] BANEIRA F, DOVAL-GANDOY J, YEPES A G, et al. Control strategy for multiphase drives with minimum losses in the full torque operation range under single open-phase fault [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6275-6285.
- [23] YEPES A G, DOVAL-GANDOY J, BANEIRA F, et al. Postfault strategy for dual three-phase machines with minimum loss in the full torque operation range under two open phases [C]// 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 3380-3385.
- [24] KESTELYN X, SEMAIL E. A vectorial approach for generation of optimal current references for multiphase permanent-magnet synchronous machines in real time [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5057-5065.
- [25] MOHAMMADPOUR A, MISHRA S, PARSA L. Fault-tolerant operation of multiphase permanent-magnet machines using iterative learning control [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 2(2): 201-211.
- [26] MORSY A S, ABDEL-KHALIK A S, AHMED S, et al. Sensorless field oriented control of five-phase induction machine under open-circuit phase faults [C]// 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 5112-5117.
- [27] 孔武斌, 黄进, 康敏, 等. 多相电机非正弦供电下的定子缺相容错控制 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(5): 9-14.
- KONG Wubin, HUANG Jin, KANG Min, et al. Fault tolerant control of a multiphase motor with non-sinusoidal source under open-phase conditions [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(5): 9-14.
- [28] TANI A, MENGONI M, ZARRI L, et al. Control of multiphase induction motors with an odd number of phases under open-circuit phase faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 565-577.
- [29] TIAN Bing, MIRZAEVA G, AN Quntao, et al. Fault-tolerant control of a five-phase permanent magnet synchronous motor for industry applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3943-3952.
- [30] TIAN Bing, AN Quntao, DUAN Jiandong, et al. Cancellation of torque ripples with FOC strategy under two-phase failures of the five-phase PM motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5459-5472.
- [31] CHENG Luming, SUI Yi, ZHENG Ping, et al. Implementation of postfault decoupling vector control and mitigation of current ripple for five-phase fault-tolerant PM machine under single-phase open-circuit fault [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8623-8636.
- [32] CHEN Qian, GU Licheng, LIN Zhipeng, et al. Extension of space-vector-signal-injection-based MTPA control into SVPWM fault-tolerant operation for five-phase IPMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7321-7333.
- [33] ZHOU Huawei, ZHAO Wenxiang, LIU Guohai, et al. Remedial field-oriented control of five-phase fault-tolerant permanent-magnet motor by using reduced-order transformation matrices [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 169-178.
- [34] LIANG Zhe, LIANG Deliang, KOU Peng, et al. Postfault control and harmonic current suppression for a symmetrical dual three-phase SPMSM drive under

- single-phase open-circuit fault [J]. IEEE Access, 2020, 8: 67674-67686.
- [35] LIU Guohai, LIN Zhipeng, ZHAO Wenxiang, et al. Third harmonic current injection in fault-tolerant five-phase permanent-magnet motor drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6970-6979.
- [36] ZHAO Y, LIPO T A. Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 578-584.
- [37] RYU H M, KIM J W, SUL S K. Synchronous frame current control of multi-phase synchronous motor: part II Asymmetric fault condition due to open phases [C]// Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 268-275.
- [38] GUZMAN H, DURAN M J, BARRERO F, et al. Comparative study of predictive and resonant controllers in fault-tolerant five-phase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 606-617.
- [39] ZHOU Huawei, ZHOU Cheng, TAO Weiguo, et al. Virtual-stator-flux-based direct torque control of five-phase fault-tolerant permanent-magnet motor with open-circuit fault [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5007-5017.
- [40] BERMUDEZ M, GONZALEZ-PRIETO I, BARRERO F, et al. Open-phase fault-tolerant direct torque control technique for five-phase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 902-911.
- [41] ALCHAREA R, NAHID-MOBARAKEH B, BETIN F, et al. Direct torque control (DTC) for six-phase symmetrical induction machine under open phase fault [C]// The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 508-593.
- [42] ALCHAREA R, KIANINEZHAD R, NAHID B, et al. Fault tolerant DTC for six-phase symmetrical induction machine [C]// 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 3279-3284.
- [43] BERMUDEZ M, GONZALEZ-PRIETO I, BARRERO F, et al. An experimental assessment of open-phase fault-tolerant virtual-vector-based direct torque control in five-phase induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2774-2784.
- [44] LU Hanxiao, LI Jian, QU Ronghai, et al. Fault-tolerant predictive current control with two-vector modulation for six-phase permanent magnet synchronous machine drives [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(2): 169-178.
- [45] GUZMAN H, DURAN M J, BARRERO F, et al. Speed control of five-phase induction motors with integrated open-phase fault operation using model-based predictive current control techniques [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4474-4484.
- [46] HUANG Wentao, HUA Wei, CHEN Fuyang, et al. Model predictive current control of open-circuit fault-tolerant five-phase flux-switching permanent magnet motor drives [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1840-1849.
- [47] KISELEV A, CATUOGNO G R, KUZNIETSOV A, et al. Finite-control-set MPC for open-phase fault-tolerant control of PM synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4444-4452.
- [48] HUANG Wentao, HUA Wei, YIN Fangbo, et al. Model predictive thrust force control of a linear flux-switching permanent magnet machine with voltage vectors selection and synthesis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4956-4967.
- [49] KODUMUR M R E, KUNISSETTI V P K, KUMAR THIPPIRIPATI V. Enhanced predictive torque control for open end winding induction motor drive without weighting factor assignment [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 503-513.
- [50] ZHAO Y, LIPO T A. Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 578-584.
- [51] CHE H S, DURAN M J, LEVI E, et al. Postfault operation of an asymmetrical six-phase induction machine with single and two isolated neutral points [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5406-5416.
- [52] BETIN F, CAPOLINO G A. Shaft positioning for six-phase induction machines with open phases using variable structure control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2612-2620.

(编辑 亢列梅)