

电机定子绕组故障容错控制概述

徐晓玲, 彭伟发, 陆荣秀

(华东交通大学, 南昌 330013)

摘要: 简要介绍定子绕组主要故障及其失效机制, 重点介绍了容错电机本体的研究进展以及电机定子绕组断路故障、端部短路故障的主要容错控制方法。容错技术将向相隔离、多相化、高性能化、智能化发展。

关键词: 故障容错; 定子绕组; 开路故障; 短路故障

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-6522(2017)04-0000-00

Abstract: Briefly introduces the main faults of the stator winding and its failure mechanism, and focuses on the research progress of the fault-tolerant motor body and the main fault-tolerant control methods of the stator winding open circuit fault and end short circuit fault.

Keywords: Fault tolerance; Stator winding; Open circuit fault; Short circuit fault

CLC Number: TP301.6

Document Code: A

Article ID: 1673-6522(2017)04-0000-00

DOI: 10.13935/j.cnki.spc.2017.04.000

1 Introduction

2 Stator winding main fault types and failure reasons

引言

所谓容错, 应包含两重意义: 电机故障时需要维持和正常时相同或相当的性能; 电机需要安全, 没有任何灾难性的破坏^[1]。

电驱动系统的改进和可靠性评估可以分为三个层次^[2]: 1) 现有系统的可靠性评价指标和方法; 2) 不改变硬件情况下的现有系统可靠性改进的算法的解决方法; 3) 基于可靠性为导向的整体系统容错操作的解决方案^[3]。

航空航天、舰船、高铁、电动汽车因为涉及到生命安全, 这些行业的快速发展给可靠性技术提供了很好的发展机遇。可靠性技术正由以硬件冗余技术(代表性的是双余度技术)为标志的初级阶段向以软件冗余技术即容错技术为标志的高级阶段发展。前者相当于系统级冗余, 后者相当于相冗余; 前者是拼装式、被动控制, 而后者是智能化、主动控制; 后者是前者的技术升级进步, 可以花更小的代价实现相同或相当甚至更好的功能。特别是对于体积、重量受限的应用场合, 容错技术显示出很大的优越性^[4]。

多相电机驱动系统越来越广泛地应用于大功率及高可靠性的场合, 如核电、高铁、多电、全电飞机、电动汽车等。多相电驱动系统相比较传统三相电驱动系统的优点有: 1) 最低次谐波的谐波次数增加,

谐波含量减小, 更容易滤波, 且可以有效降低转矩脉动, 控制性能更好; 2) 一旦发生缺相故障, 控制其它健康相继续平稳可靠运行; 3) 可以有效降低功率管的单管容量, 用低压器件实现大功率; 4) 拥有更多的电压矢量资源, 更有利于控制电机磁链和转矩。

定子绕组主要故障类型及失效原因

电机本体定子主要故障^[5]: 定子绕组断路、定子绕组匝间短路、定子绕组相间短路、定子绕组端部短路、定子绕组对地短路。

电机本体定子失效主要原因^[6]: 1) 定子铁心或绕组温度高; 2) 松弛的铁心、槽楔和接头; 3) 端部绕组紧固装置松脱; 4) 放电; 5) 冷却系统泄漏。

电机定子绕组开路时, 电机结构不对称, 定子磁动势也不对称, 转矩出现低频振动, 严重影响系统性能甚至无法稳定运行。电机定子绕组短路故障发生时, 电机本体会受到很大的冲击电磁力及电磁力波, 若不采取积极措施, 强大的电流冲击将对电驱动系统造成很大的损害, 转矩波动很大。

对于电机绕组的开路、短路故障容错控制, 三相电机驱动系统显得捉襟见肘, 办法不多, 一般就是增加电机中线来实现电机绕组开路故障容错, 而对电机绕组短路故障则很少研究。多相电机驱动系统则显示出它的优势, 冗余自由度较多, 可以实现开路故障状态下的无扰容错运行; 而对于电机绕组短路故障, 则要求电机本体具备抑制短路电流能力, 目前对其进行研究的主要有开关磁阻电机和容错永磁电机。

收稿日期: 2017-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575001); 华东交通大学校立科研基金项目(2016-2017)

徐晓玲等: 电机定子绕组故障容错控制概述

05

感应损耗^[9] 年,意大利^[10]大学的^[11] ^[12]分析了^[13]空间谐波对分数槽永磁电机转子损耗的影响,通过一个简单的转子损耗模型,研究了分数槽电机转子损耗与极槽配合之间的联系^[9] ^[9] ^[9]

2015 年,南京航空航天大学的郝振洋^[4]、胡育文^[5]、黄文新和余文涛研制了一台 6 相 6 极的容错永磁电机,该电机各相相对独立,自感大互感很小,对绕组开路以及绕组端部短路都具有很强的容错能力并得到了实验验证^[6]。

ú 容错控制方法研究

容错控制最基本的要求是故障后电机还能继续可靠运行,在此基础上,尽量减小谐波,提高功率密度,降低铜耗 γ 转矩脉动 ρ 。为了进一步提升控制性能,各种智能控制方法分别应用到开路故障容错控制中,ÜüäüÖöôïöñÖÛÄöñöÖüäüäöÝñïöä等人将模糊控制 γ 滑模控制^[61] γ 预测控制^[62] γ 神经网络控制^[63] γ 模型参考自适应控制^[64]应用到缺相控制中,提高了容错控制的鲁棒性 ρ 。

下面将对主要容错控制算法分类说明b

 $\dot{U}_{\text{U}}\dot{U}_{\text{V}}$ 短路相总磁链等于零控制
$$\emptyset \quad \text{æ} \quad \hat{\text{a}}\hat{\text{i}}\tilde{\text{ã}} \quad \frac{\hat{\text{a}}\hat{\text{ú}}}{\hat{\text{a}}\hat{\text{É}}} \quad \text{æ} \quad \hat{\text{a}}\hat{\text{i}}\tilde{\text{ã}}\tilde{\text{n}} \quad \frac{\hat{\text{a}}\hat{\text{i}}}{\hat{\text{a}}} \quad \tilde{\text{ã}}\hat{\text{o}}$$

如若保持短路相全磁链为零,则短路相电流也等于零^[1]。根据这一思路,容错控制需要调整其它健康相电流幅值和相位^[2]。一要使短路相全磁通等于零,二要补偿故障相,使故障前后转矩不变并使定子损耗最小^[3]。

这种容错控制方法难度比较大,短路相故障后相电压瞬间变为零,要控制全磁链也等于零,中间过渡过程磁链 ψ 相电压变换很大,则短路相电流可能非常大,而且会影响其它正常相,进而损坏整个电驱动系统。文献[6]只给出了有限元仿真结果,没有实验结果,后面也没有进一步的研究。

基于旋转不变控制算法

电机定子绕组发生开路故障时,控制其他健康相电流,使故障前后总的旋转 $\vec{U}\vec{U}\vec{0}$ 不变,就可以使电机继续平稳运行。

对电机驱动系统容错控制研究最早是从传统的三相电机驱动系统开始的, 首先研究的是电机定子绕组开路故障容错^[6]。文献^[6]研究了三相感应电机定子绕组一相开路时的故障容错控制算法, 其原则是故障前后总的旋转速度 ω 不变。三相感应电机

$$i_a = \frac{\hat{A} \hat{A} \hat{O} \hat{O} \hat{A} \hat{A} \hat{O} \hat{O} \hat{A} \hat{A}}{\hat{A} \hat{A} \hat{O} \hat{O} \hat{O} \hat{A} \hat{A} \hat{O} \hat{O} \hat{O} \hat{A} \hat{A}} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}}$$

容错控制系统通过电流控制器,使电枢各相电流跟踪该给定电流实现容错

不对称多相电机的矢量控制

前面提到的容错控制方法都没有对转矩实施精确控制,要实现转矩的精确控制就必须对电流

$$\begin{aligned} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} &= \frac{\hat{y}}{\hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{p}} \left\{ \begin{aligned} \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} &= \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} \left(\hat{u} \hat{a} \hat{u} \hat{p} \hat{O} \hat{E} \hat{A} \right) \\ \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} &= \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} \left(\hat{u} \hat{a} \hat{y} \hat{y} \hat{O} \hat{y} \hat{A} \right) \\ \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} &= \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} \left(\hat{u} \hat{a} \hat{y} \hat{N} \hat{B} \hat{O} \hat{y} \hat{A} \right) \\ \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} &= \hat{E} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} \left(\hat{u} \hat{a} \hat{y} \hat{u} \hat{E} \hat{O} \hat{E} \hat{A} \right) \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

在磁动势不变和功率不变的原则下,采用新的旋转坐标变换,得到 $\hat{N} \hat{D}$ 坐标系下不对称双 \hat{A} 形 \hat{E} 相永磁同步电动机的电机方程:

$$\begin{aligned} \hat{u}_N^{\circ} &= \hat{N} \hat{n}_a \hat{i}_N^{\circ} \hat{a} \hat{y} \hat{y} \hat{O} \hat{u}_a^{\circ} \\ \hat{u}_D^{\circ} &= \hat{y} \hat{n}_a \hat{i}_D^{\circ} \\ \sigma_N^{\circ} &= \hat{a} \hat{i}_N^{\circ} \hat{a} \hat{Y} \hat{u}_N^{\circ} \hat{a} \hat{y} \hat{N} \hat{e}^{\frac{1}{2} \hat{u}} \hat{u}_D^{\circ} \\ \sigma_D^{\circ} &= \hat{a} \hat{i}_D^{\circ} \hat{a} \hat{Y} \hat{u}_D^{\circ} \hat{a} \hat{y} \hat{O} \hat{u}_a^{\circ} \hat{u}_N^{\circ} \\ \hat{e}_a &= \hat{O} \left[\hat{y} \hat{y} \hat{O} \hat{u}_a^{\circ} \hat{i}_D^{\circ} \hat{a} \left(\hat{n}_N \hat{a} \hat{n}_D \right) \hat{i}_N^{\circ} \hat{u}_D^{\circ} \right] \\ \hat{e} \hat{Y} \hat{u} &= \hat{e}_a \hat{a} \hat{e}_a \hat{a} \hat{c} \hat{u} \end{aligned}$$

式中: \hat{u}_N° , \hat{u}_D° 为新旋转坐标系 \hat{N} , \hat{D} 轴定子磁链分量; \hat{i}_N° , \hat{i}_D° 为新旋转坐标系 \hat{N} , \hat{D} 轴定子电流分量; σ_N° , σ_D° 为新旋转坐标系 \hat{N} , \hat{D} 轴定子电压分量; \hat{n}_N , \hat{n}_D 为 \hat{N} , \hat{D} 轴电感分量; \hat{a} 为定子电阻; \hat{O} 为极对数; \hat{Y} 为微分算子, $\hat{Y} \hat{E} \hat{a} \hat{E}$; \hat{u}_a 为转子永磁体磁链; \hat{u}_a 为电角速度; \hat{u} 为转子机械角速度; \hat{e}_a 为外加负载力矩; \hat{c} 为阻尼系数

据此可对此开路状态下永磁同步电动机进行精确解耦的磁场定向矢量控制

结 语

可靠性技术正从硬件冗余技术向软件冗余技术发展,容错永磁电机是目前研究的热点,它最重要的特点是各相独立,自感足够大,可以抑制短路电流。主动控制多相分数槽集中绕组电驱动将是未来最有希望最有前途的容错方案,容错功能也将成为高安全可靠性电机驱动系统的一项基本功能。

容错控制的关键挑战是快速检测到故障并触发启动容错机制。容错技术将向相隔离多相化、高性能化、智能化发展。

参考文献

- [1] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.

链和转矩进行解耦,为此提出了不对称多相电机的磁场定向矢量控制。双 \hat{A} 形 \hat{E} 相永磁同步电动机开路故障时结构不对称,采用传统坐标变换时不能实现解耦控制,文献 [4] 提出了一种新的旋转坐标变换,真正实现了不对称多相永磁同步电动机的矢量控制。坐标变换矩阵:

- [1] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [2] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [3] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [4] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [5] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [6] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [7] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [8] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [9] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [10] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [11] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [12] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [13] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [14] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [15] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [16] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [17] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [18] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [19] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.
- [20] 王树强, 王树强, 王树强, 等. 永磁同步电动机容错控制. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 1000-1005.

专利名称:一种快速高精度永磁同步电机位置
信息获取系统

专利申请号: aÇÿpÿÑýpüÊËÜúú

公开号: aÇýpÑøpÿýÑúá

申请日: ýpÿÑüýpüýp 公开日: ýpÿüüþýüþÊ

申请人: 中国科学院上海技术物理研究所

本发明公开了一种快速高精度永磁同步电机位置信息获取系统。该系统采用 yNÖü 高精度绝对式光栅编码器作为角度传感器, 采用 ÜsÖöryüý 协议进行数据传输, 系统有两路差分信号: òaÜa½ ýòáÜáü 信号和 aü½ ýaüü 信号。其中 aü 信号通过高速 ÁpüüÊø 接口芯片单向传输给码盘, 绝对式光栅编码器通电后得到位置信号 òaÜa, 在 aóíÖ 时序逻辑控制下该 òaÜa 信号传送给 Öbó 进行数据解算。本发明的优点在于纯数字电路接口, 避免了复杂的信号采集电路, 电路结构简单, 上电后可以立即得到位置信号。

专利名称: 新型永磁发电机

专利申请号: aÇÿpÿÑýpÿpüüüÊüþ

公开号: aÇýpÑøýÊþüÊá

申请日: ýpÿÑüþüýý 公开日: ýpÿüüþýüýø

申请人: 安鲁荣

一种新型永磁发电机定子内壁辐射状均匀设置定子压线槽, 或在定子铁心外壁辐射状设均匀置定子压线槽, 环状绕组线圈一边嵌入压线槽内从定子端部弧状绕时空槽嵌入应对另一边的压线槽内形成轴向环状绕组线圈。与环状绕组线圈垂直对面未设环状绕组线圈, 空槽数量根据需要增减, 环状绕组线圈在定子端部对半反向绕时空槽。在永磁磁极应对轴向环状绕组线圈的两个边时, 在一定的角度范围内可做往复振动发电。其效率高、结构紧凑、重量轻、应用范围广。

专利名称: 一种开关磁阻电机

专利申请号: aÇÿpÿýýpÿýüýÊüý

公开号: aÇýpÑøýÊýÊÑá

申请日: ýpÿýüþÊüýÊ 公开日: ýpÿüüþýüýø

申请人: 扬州博世特工具有限公司

本发明公开了一种开关磁阻电机。该开关磁阻电机, 包括转子和定子, 其特征在于: 在定子与转子之间设置用于降噪的隔音层, 所述的隔音层外侧与定子契合, 隔音层内侧设置有密集排布的盲孔, 所述的定子外侧设置有散热翅片。采用该技术方案, 在定子与转子之间设置用于降噪的隔音层, 隔音层的密集排布有盲孔, 有效的吸收了定子旋转产生的噪音, 且不会增加开关磁阻电机的体积, 定子外侧的散热翅片增加散热效果。

专利名称: 具有多重防腐蚀保护的永磁体转子的
内部激励的同步电动机

专利申请号: aÇÿpÿýÊþpüþÑøÑüÑ

公开号: aÇýpÑøþÑýÊýá

申请日: ýpÿýüþýüýü 公开日: ýpÿüüþýüþÊ

申请人: 德国安德里茨里茨有限责任公司

本发明涉及一种电机的用于借助永磁体激励转子的模块, 所述转子在液态介质中旋转, 其中, 所述模块包含圆柱形的有效部件, 该有效部件具有多个圆形的 y 组合成叠片组的软磁薄板, 所述薄板具有用于容纳转子轴的中央孔, 并且其中, 至少两个永磁体被与液态介质相阻隔地安置在叠片组内的至少两个相应的开槽中, 并且其中, 所述开槽被设计在叠片组的圆柱形圆周表面的下方。

专利名称: 汽车用轴向电励磁无刷发电机

专利申请号: aÇÿpÿÑýpüÊüüüÊü,

公开号: aÇýpÑøýÊýÊþá

申请日: ýpÿÑüýpüýø 公开日: ýpÿüüþýüýø

申请人: 张学义

本发明提供一种汽车用轴向电励磁无刷发电机, 属于汽车电机电器技术领域, 由电励磁系统、发电系统、转子、前端盖、后端盖组成, 电励磁系统的数量和发电系统的数量相等并且相互间隔通过螺钉固定在后端盖内腔中的同一圆周上, 转子为法兰盘结构, 既没有电励磁绕组, 也没有永磁体, 结构简单, 转动惯量小, 电励磁绕组和电励磁绕组铁心均固定在发电机后端盖上, 无碳刷滑环结构, 故障率低。

专利名称: 一种永磁直线电机用无位置传感器

专利申请号: aÇÿpÿÑýpüÊþüÊÑüÊ

公开号: aÇýpÑøþýýøýá

申请日: ýpÿÑüýpüýø 公开日: ýpÿüüþýüþÊ

申请人: 东南大学

本发明公开了一种永磁直线电机用无位置传感器, 在电机启动之前给逆变器通入指定的触发信号, 求出相应的线电感值, 并结合电机已有的电感参数进行计算, 初步得出直线伺服电机的初始位置, 随后立即通入高频电压判断出动子的磁极方向; 电机启动之后, 在低速段采用高频电压注入与重复控制器相结合的方法来实时检测动子位置, 中高速段采用基于扩展反电动势模型的滑模观测器与饱和函数算法相结合来实时获取动子位置信息。本发明将初始位置检测方法、旋转高频注入法、重复控制和滑模观测器结合在一起, 可以准确、有效的检测直线伺服电机的位置信息, 克服了机械式传感器的存在带来的弊端, 提高了系统的可靠性。