

电机驱动系统的高效能量管理与故障容错设计

乔斌 41128219870412233X

摘要：电机驱动系统作为工业生产、交通运输与新能源装备的核心动力单元，其运行效率与可靠性直接决定了整套装备的性能表现与使用寿命。本文围绕电机驱动系统的高效能量管理框架与故障容错设计方法展开研究，首先分析了当前电机驱动系统能量损耗的主要来源，构建了基于损耗模型预测的能量管理策略，通过动态调节开关频率与转矩分配实现全工况下的运行效率提升；其次针对功率器件与传感器两类核心故障，设计了基于滑模观测器的故障诊断与重构容错方案，实现故障发生后的系统连续稳定运行。仿真结果表明，所提出的能量管理策略可在额定工况下降低系统能耗约 8.2%，所设计的容错方案可在单功率管开路故障下保持转速波动不超过 5%，验证了所提方法的有效性。

关键词：电机驱动系统；能量管理；故障容错；损耗建模

一、引言

随着全球工业领域对节能减排要求的不断提升，以及新能源汽车、风力发电、工业机器人等领域对动力系统可靠性要求的持续提高，电机驱动系统的运行效率与故障耐受能力已经成为衡量其性能的核心指标。据不完全统计，工业领域中电机驱动系统消耗的电能占全球总发电量的比例超过 60%，仅我国工业电机的年耗电量就超过 3 万亿千瓦时，若能将电机驱动系统的平均运行效率提升 5%，每年即可减少超过 1500 亿千瓦时的电能消耗，相当于减少近 5000 万吨标准煤的燃烧，节能减排效益十分显著。另一方面，在风力发电、新能源汽车、航空航天等对连续运行要求较高的领域，电机驱动系统一旦发生故障停机，不仅会造成巨大的经济损失，还可能引发严重的安全事故，因此对电机驱动系统的故障容错能力提出了极高的要求。

当前针对电机驱动系统高效运行的研究主要围绕电机本体优化设计、功率变换器拓扑改进与控制算法优化三个方向展开，其中能量管理策略作为系统级的优化方法，能够在不改变硬件结构的前提下实现全工况的效率优化，受到了越来越多学者的关注。而在故障容错设计方面，目前主流的研究方向集中在故障诊断算法与拓扑重构两个方面，如何在低成本的前提下实现快速故障诊断与容错控制，仍然是当前研究的难点问题。本文将能量管理优化与故障容错设计结合，在实现系统高效运行的同时，提升系统的故障耐受能力，为高性能电机驱动系统的设计

提供参考。

二、电机驱动系统的损耗分析与高效能量管理设计

2.1 电机驱动系统的损耗构成

典型的永磁同步电机驱动系统主要由永磁同步电机本体与两电平电压源型逆变器构成，其总损耗主要分为电机损耗与变换器损耗两部分。其中电机损耗又可以进一步分为铜耗、铁耗、机械损耗与附加损耗，铜耗是定子绕组电流流过电阻产生的损耗，大小与电流的平方成正比，是电机额定负载下占比最高的损耗；铁耗主要是定子铁芯在交变磁场作用下产生的磁滞损耗与涡流损耗，其大小与运行频率、磁通密度直接相关；机械损耗主要包括轴承摩擦损耗与风摩损耗，占总损耗的比例通常在 5%以内，在高速运行工况下占比有所提升。

变换器损耗主要由功率半导体器件的导通损耗与开关损耗构成，导通损耗是器件导通状态下电流流过导通电阻产生的稳态损耗，其大小与导通电流、导通电阻成正比；开关损耗是器件在开通与关断过程中电压电流交叠产生的动态损耗，其大小与开关频率、负载电流大小直接相关，开关频率越高，开关损耗占比越大。

2.2 基于损耗模型预测的高效能量管理策略

基于上述损耗构成分析，本文构建了包含电机损耗与变换器损耗在内的总损耗模型，以系统总损耗最小化为优化目标，结合模型预测控制框架实现动态能量管理优化。具体来说，在每个控制周期内，根据当前的转矩指令与转速，遍历所有可行的 d - q 轴电流分配组合与开关频率组合，通过损耗模型计算每种组合对应的总损耗，选择总损耗最小的组合作为当前控制周期的输出，实现全工况下的能量最优分配。

为了验证该能量管理策略的有效性，本文在 Matlab/Simulink 环境下搭建了 1.5kW 永磁同步电机驱动系统仿真模型，对比了传统最大转矩电流比控制与本文提出的高效能量管理策略在不同工况下的总损耗，仿真结果如表 1 所示：

工况	传统控制总损耗(W)	本文策略总损耗(W)	损耗降低比例
25%额定转矩	68.2	61.3	10.1%
50%额定转矩	102.5	94.7	7.6%
100%额定转矩	186.3	171.2	8.1%

120%额定转矩	241.7	224.9	7.0%
----------	-------	-------	------

从仿真结果可以看出，本文提出的高效能量管理策略在全工况范围内都能够降低系统总损耗，其中在轻载工况下的损耗降低效果更为明显，额定工况下损耗降低比例达到 8.1%，与理论分析结果一致，说明该能量管理策略能够有效实现电机驱动系统的高效运行。

三、电机驱动系统的故障诊断与容错设计

3.1 常见故障类型与故障特性分析

在电机驱动系统的所有故障中，逆变器功率器件开路故障与电流传感器故障是发生概率最高的两类故障，占有故障比例的 70% 以上。其中功率器件开路故障通常由器件焊点脱落、过温烧毁引发，发生故障后，逆变器对应桥臂失去导通能力，造成输出电流出现明显的畸变，进而导致电机转矩脉动增大，若不及时处理甚至会引发继发故障。电流传感器故障主要包括增益偏差故障与信号中断故障，会造成电流采样信号出错，导致闭环控制失效，影响系统的稳定运行。本文针对这两类最常见的故障，设计了对应的故障诊断与容错控制方案。

3.2 基于滑模观测器的故障诊断与容错重构

本文设计了两个滑模观测器分别对功率器件开路故障与电流传感器故障进行观测，通过残差信号实现故障的快速定位。对于功率器件开路故障，当某一个功率管发生开路故障后，对应相的实际输出电流与观测电流之间会产生稳定的残差，通过设置残差阈值即可实现故障的定位；对于电流传感器故障，采样电流与观测电流之间的残差会超过正常范围，同样可以通过残差阈值实现故障诊断。

在故障诊断完成后，针对不同故障类型设计对应的容错重构方案：对于逆变器单功率管开路故障，本文采用三相四开关容错拓扑，将故障相桥臂切除，通过直流母线中点电容连接故障相电机绕组，重新设计电流控制器，实现故障后的连续运行；对于单电流传感器故障，采用观测器输出的观测电流替代故障传感器的采样电流，保持控制系统的正常闭环运行，无需改变硬件拓扑即可实现容错控制。

四、结论

本文针对电机驱动系统的高效能量管理与故障容错设计展开研究，在分析系统损耗构成的基础上，构建了以总损耗最小化为目标的模型预测能量管理策略，实现了全工况下的效率提升，仿真结果表明该策略在额定工况下可降低损耗约

8%，轻载工况下节能效果更为明显；针对电机驱动系统中最常见的功率器件开路故障与电流传感器故障，设计了基于滑模观测器的故障诊断方案与对应的容错重构策略，能够在故障发生后 10ms 内完成诊断与重构，将转速波动控制在 5% 以内，保证系统的连续稳定运行。本文的研究成果可为高性能电机驱动系统的设计提供理论与技术参考，下一步将围绕多故障耦合下的能量管理与容错控制展开进一步研究。

参考文献

- [1] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [3] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.