



基于滑动磁桥的永磁电机 机械弱磁性能研究

段 蓉^{1,2}, 侯晓军^{1,2}, 庞 聪^{1,2}, 吴 楠^{1,2}, 倪 伟^{1,2}, 张 莎^{1,2}

(1. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502;

2. 轨道交通牵引电机山西省重点实验室, 山西 永济 044502)

摘要: 针对轨道交通永磁电机在故障工况下因磁场无法调节而引起发热与振动加剧的问题, 考虑故障导向安全原则, 文章提出一种基于滑动磁桥的磁场可调永磁同步电机, 利用电机拓扑变换实现正常工况下牵引电机的转矩输出与故障工况下电机的磁场调节。文章通过分析电机转子漏磁阻对电机磁链及直轴电感的影响, 研究滑动磁桥工作位置变换对电机永磁磁链的调节作用, 实现了对故障电流及运行转矩脉动的削弱。研究表明, 基于滑动磁桥的磁场可调永磁同步电机在保证电机输出的同时能够通过拓扑变换削弱主磁通、增大直轴电感, 减小故障电流及拖动转矩的脉动, 从而削弱故障运行中产生的电磁损耗和机械振动, 实现电机故障导向安全设计。

关键词: 轨道交通; 永磁同步电机; 滑动磁桥; 磁场可调; 故障电流; 故障导向安全

中图分类号: U264.1; TM351

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)01-0036-07

0 引言

永磁同步牵引电机(PMSM)凭借永磁体励磁带来的高功率因数、大输出转矩及低电磁损耗等优势^[1], 以其高效、高功率密度的特性, 已成为下一代轨道交通牵引电机的重要发展方向^[2-3]。然而, 永磁磁场调节困难的固有特性也带来了挑战: 车辆运行过程中一旦发生短路故障, 故障绕组内部将产生幅值极大的短路环流, 不仅会引起电机剧烈振动、绕组过热, 严重时还可能引发燃烧, 危及行车安全^[4]。为避免故障扩大^[5], 电机在故障后需具备深度弱磁能力, 以提高运行可靠性^[6-7]。

目前, 为增强永磁同步电机的磁场调节能力, 国内外学者提出了多种拓扑方案^[8]。记忆电机可通过调节永磁体工作点实现调磁, 但存在工作点观测困难、充/去磁磁势控制复杂的问题^[9-10]。混合励磁永磁同步电机可利用附加励磁绕组进行磁场调节, 但励磁绕组的引入降低了

电机效率^[11]。机械调磁永磁同步电机可通过机械装置调节主磁路或漏磁路来改变永磁磁链^[12-13], 但存在电机结构过于复杂等问题。离心式机械调磁永磁同步电机采用副永磁体固定、主永磁体可在槽中滑动的方案, 实现了当转速升高、离心力增大时, 主永磁体沿槽向外滑动进而减小转子轭部漏磁阻的功能, 永磁磁链沿漏磁路闭合, 可削弱绕组的永磁磁链^[14], 但该方案仅能在特定高速工况下被动调节, 无法实现主动控制。机械变磁通永磁同步电机通过添加短路块扩大漏磁磁路, 弱磁工况时短路块可在弹簧的作用下沿导轨轴向运动, 形成漏磁回路, 从而扩大电机漏磁磁链并削弱主磁链, 实现最大弱磁深度36.4%。尽管上述方案均能实现对电机磁场的调节, 但在快速响应短路故障方面, 存在缺乏主动控制、结构复杂等问题, 同时由于弱磁能力有限, 难以实现可靠的深度弱磁。

针对上述问题, 本文提出一种基于滑动磁桥的磁场可调永磁同步电机(flux-adjustable PMSM, FA-

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2021YFB3803000)

通信作者: 段 蓉, 女, 主要从事轨道交通车辆牵引电机本体设计方面的研究; E-mail: 15536958929@163.com

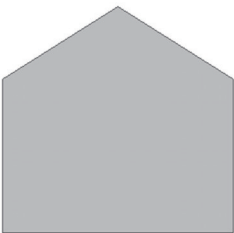
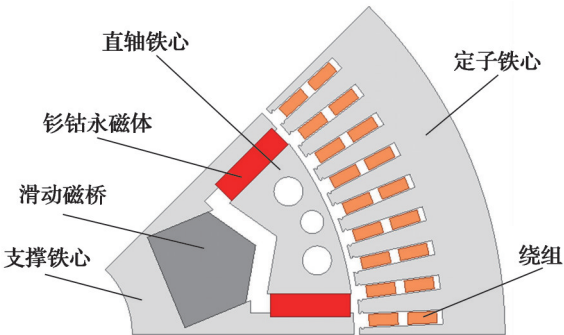
引用格式: 段蓉, 侯晓军, 庞聪, 等. 基于滑动磁桥的永磁电机机械弱磁性能研究[J]. 机车电传动, 2026(1): 36-42. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.005.

Citation: DUAN Rong, HOU Xiaojun, PANG Cong, et al. Research on mechanical flux weakening performance of permanent magnet synchronous motors based on sliding magnetic bridges[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 36-42. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.005.

PMSM)新拓扑。该拓扑利用液压保护执行系统实现滑动磁桥工作气隙的主动调节,从而短路大量主磁通,实现故障工况下的机械调磁。本文针对滑动磁桥的作用机理进行分析,通过建立FA-PMSM的等效电路和磁路模型^[15]来研究电机短路电流、主磁通及直轴电感之间的关系;利用Maxwell软件建立电机模型,分析滑动磁桥动作前后的电磁特性;并搭建外电路,验证滑动磁桥在实现故障导向安全性能方面的有效性。

1 磁场可调永磁电机拓扑与参数

基于滑动磁桥的FA-PMSM由常规定子和磁场可调转子两部分构成,其拓扑如图1所示。其中,转子部分由支撑铁心、直轴铁心、钕钴永磁体及滑动磁桥构件组成,滑动磁桥形状如图1(b)所示,转子通过碳纤维护套实现对各部分的约束。当电机发生故障后,故障诊断算法通过分析电机电流频谱中的谐波特征确定故障状态,并生成触发信号并将该信号传递至继电器,由其接通液压控制系统的电路。液压系统被激活后驱动与滑动磁桥机械相连的执行机构,从而控制滑动磁桥沿轨道动作,进入故障导向安全的运行工况。为保障正常态电机的输出性能,滑动磁桥动作行程设计为12 mm。由于电机磁场呈对称分布,本文采用电机的1/8模型进行分析。电机具体参数如表1所示。



(b) 滑动磁桥
图1 FA-PMSM拓扑

Fig. 1 Topology of FA-PMSM

2 滑动磁桥工作原理

电机等效电路图如图2所示。图2中, U_a 、 U_b 、 U_c

表1 磁通可调永磁同步电机参数

Table 1 Parameters of FA-PMSM

参数名称	参数值
额定功率 P/kW	750
额定转矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$	1 705
每相电枢绕组匝数 N_a	120
气隙宽度 g/mm	1.8
永磁体剩余磁感应强度 B_r/T	1.18
永磁体相对磁导率 $\mu_r/(\text{H}\cdot\text{m}^{-1})$	1.05
定子极数 N_s	8
转子极数 N_r	72
磁桥初始气隙 g_0/mm	12
滑动磁桥长度 a/mm	50
滑动磁桥宽度 b/mm	34
滑动磁桥顶角 $c/(\text{^\circ})$	65

分别为电机a、b、c相的端电压; L_a 、 L_b 、 L_c 分别为各相电感; R_a 、 R_b 、 R_c 分别为各相电阻; E_a 、 E_b 、 E_c 分别为各相反电动势。当电机发生匝间或相间短路故障后,为防止故障进一步扩大,系统主动将电机切入三相短路状态,实现永磁电机异常工况下的快速保护。

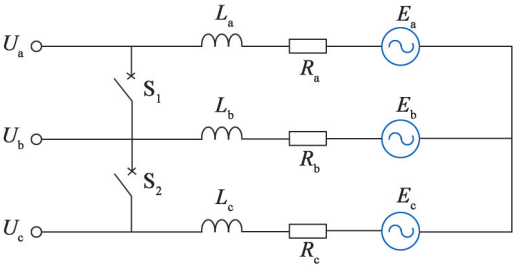


图2 电机等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of motor

三相反拖工况下,牵引电机在 d - q 坐标系中的短路电流可表示为:

$$i_d(t) = \frac{\psi_0}{L_d} e^{-\frac{t}{\tau}} \cos(\omega t + \theta_1) - \frac{\psi_{PM}}{L_d} \tag{1}$$

$$i_q(t) = -\frac{\psi_0}{L_q} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t + \theta_1) \tag{2}$$

式中: i_d 、 i_q 分别为短路电流的直轴、交轴分量; ψ_{PM} 、 ψ_0 分别为电机的永磁磁链和总磁链,且永磁磁链是主磁链的一部分; L_d 、 L_q 分别为电机直轴电感、交轴电感; θ_1 为电机永磁磁链和总磁链的夹角; ω 、 τ 分别为电机电流的电角速度及时间常数。

短路电流由暂态分量和稳态分量两部分构成,其中,瞬态短路电流大小随 ψ_0 增大而增大,随 L_d 、 L_q 增大而减小;稳态短路电流随 ψ_{PM} 增大而增大,随 L_d 增大而减小。因此短路电流与电机磁链成正比,与电机交轴、直轴电感成反比。其中,稳态短路电流仅与电机的永磁磁链及直轴电感有关,降低电机的永磁磁链,增大直轴电感能有效减小电机的短路电流。

为分析电机磁链、直轴电感与转子漏磁阻的关系,建立电机的简化等效磁路模型如图3所示。图3中 F_{PM} 、

F_A 分别为永磁磁势和电枢磁势, R_{PM} 为永磁体磁阻; R_δ 、 $R_{\delta r}$ 、 $R_{S\delta}$ 分别为气隙磁阻、转子漏磁阻与定子漏磁阻; R_{RE} 、 R_{SE} 、 R_{ST} 分别为转子轭部磁阻、定子轭部磁阻及转子齿部磁阻。

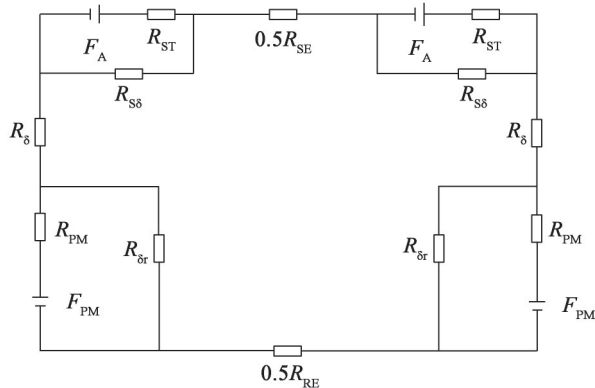


图3 简化等效磁路模型

Fig. 3 Simplified equivalent magnetic circuit model

根据电机简化等效磁路模型求解电机的主磁通 Φ_δ 、直轴电感 L_d 和转子侧漏磁阻 $R_{\delta r}$, 相关计算公式为:

$$\Phi_\delta = \frac{2 \left(\frac{R_{S\delta}}{R_{ST} + R_{S\delta}} F_A + \frac{R_{\delta r}}{R_{PM} + R_{\delta r}} F_{PM} \right)}{2R_{ST} + \frac{R_{SE}}{2} + \frac{R_{RE}}{2} + 2R_\delta + 2 \frac{R_{\delta r} R_{PM}}{R_{PM} + R_{\delta r}}} \quad (3)$$

$$L_d = \frac{1}{2R_{ST} + \frac{R_{SE}}{2} + \frac{R_{RE}}{2} + 2R_\delta + 2 \frac{R_{\delta r} R_{PM}}{R_{PM} + R_{\delta r}}} \quad (4)$$

$$R_{\delta r} = \frac{2g_b \arcsin\left(\frac{c}{2}\right)}{\mu a L_{st}} \quad (5)$$

式中: L_{st} 为电机的等效铁长; μ 为真空中的磁导率。

由式(3)计算可得, 通过改变电机转子轭部磁路磁阻能够实现对电机主磁通 Φ_δ 的调节, 且转子主磁通 Φ_δ 与转子轭部漏磁路磁阻 $R_{\delta r}$ 成正比; 同理由式(4)可得电机直轴电感 L_d 与轭部漏磁路磁阻 Φ_δ 呈负相关。当滑动磁桥向外动作时, g_b 由初始值 12 mm 减小到 0 mm; 由式(5)可得, 转子侧漏磁路磁阻 $R_{\delta r}$ 减小, 大量永磁磁通被短路, 电机主磁通 Φ_δ 随之减小, 同时电机直轴电感也随之增大。

综上所述, 当电机进入故障运行状态后, 滑动磁桥动作, 通过减小转子侧漏磁路磁阻来减小电机永磁磁链、增大直轴电感, 降低电机故障稳态电流, 实现电机故障导向安全。

3 磁通可调永磁同步电机的输出特性

滑动磁桥通过在永磁同步电机转子内部引入可控的漏磁路径, 调节该路径的磁阻, 即可实现对永磁磁链的有效调节。磁通可调永磁同步电机的输出特性包括两种工作状态: 正常工作状态下, 需保证电机的输出性能满足运行工况需求; 故障运行状态下, 滑动磁

桥需迅速动作, 实现机械弱磁控制。

为进一步研究滑动磁桥对磁通可调永磁同步电机输出性能的影响, 本文利用有限元软件对电机的输出性能进行分析。滑动磁桥正常工作状态和故障运行状态的空载永磁磁场分布情况如图4所示。由图4(a)可知, 正常工作时, 永磁体和滑动磁桥之间存在较大气隙, 电机主磁通从永磁体经气隙进入定子, 参与电磁能量转换; 当电机出现短路故障后, 液压机构动作, 电机滑动磁桥解除控制, 并在磁力作用下沿轨道向外滑动, 直至气隙缩小到 0 mm, 如图4(b)所示, 此时绝大多数永磁磁通被高饱和磁密、高磁导率的滑动磁桥短路, 仅有少部分磁通流入主磁路参与电磁能量转换。

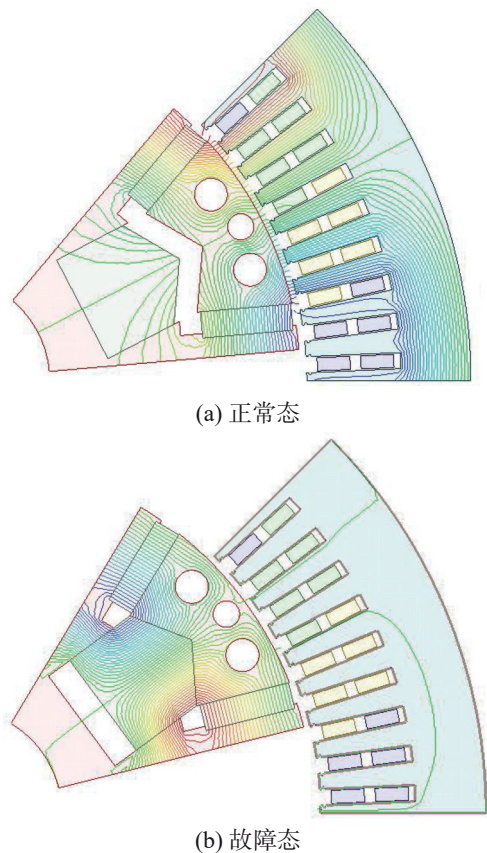
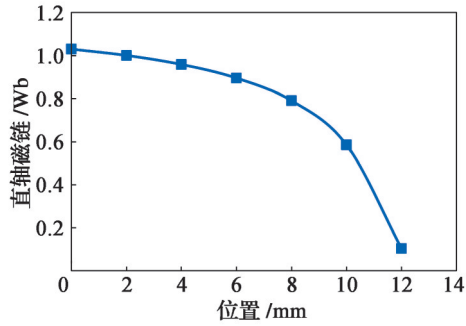


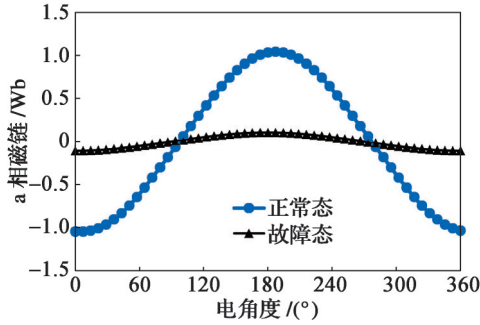
图4 空载永磁磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distribution for no-load permanent magnet

正常工作状态与故障运行状态下的空载永磁磁链波形如图5所示。由图5(a)可知, 随着滑动磁桥沿轨道向外滑动, 磁桥的行程由 0 mm 增加到 12 mm, 滑动磁桥与直轴铁心的气隙逐渐减小, 转子漏磁路的磁阻减小, 泄漏的磁通增加, 导致电机匝链的直轴有效磁链随之减小; 其中, 在磁桥行程 8 mm 变化至 12 mm 阶段, 电机直轴磁链的降幅最大。由图5(b)可知, 正常工作状态下, 滑动磁桥锁定在行程为 0 mm 的位置, 电机的直轴磁链为 1.03 Wb, 可为电机正常运行提供所需的磁动势; 电机故障运行状态下, 磁桥滑动直至行程结束, a 相绕组匝链的磁链有效值下降至 0.073 Wb, 与电机正常运行时相比下降幅度超过 90%, 大部分主磁路磁链被滑动磁桥短路, 从而实现了电机的机械弱磁。



(a) 不同滑动磁桥位置下电机的直轴磁链

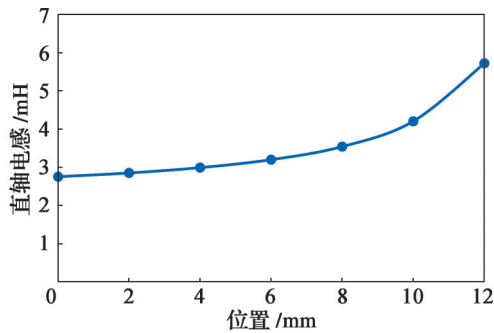


(b) 正常及故障工况电机的a相磁链

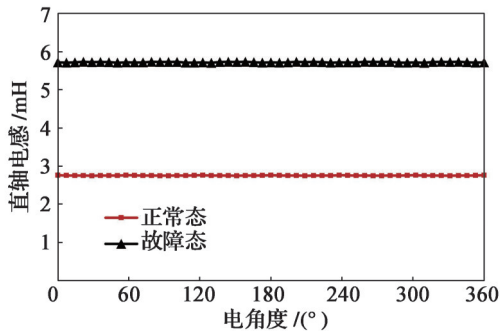
图5 电机空载磁链

Fig. 5 No-load flux linkage of motor

电机空载直轴电感相关变化波形如图6所示。由图6可知,电机直轴电感和磁路磁阻近似成正比。随着滑动磁桥行程的增加,电机直轴磁路上的漏磁路磁阻逐渐减小,导致直轴电感明显增加,其中,滑动磁桥在8 mm至12 mm行程段,电机直轴磁链的增幅最大。滑动磁桥结束行程后,磁通可调永磁同步电机的电感由2.87 mH增加到5.72 mH,这有利于故障稳态运行电流的削弱。



(a) 不同滑动磁桥位置直轴电感



(b) 正常及故障工况电机直轴电感

图6 电机空载直轴电感

Fig. 6 No-load d-axis inductance of motor

电机设计除需满足故障工况下的弱磁需求外,还应保证其在正常工作状态下具备充足的输出能力,以满足实际运行要求。图7为额定电流下电机的电磁转矩变化波形,正常工作状态下,额定转速时的输出转矩为1 705 N·m,能够满足额定点750 kW的输出功率要求;额定点转矩脉动为4.25%,同样能够满足牵引系统对电机转矩脉动的要求。

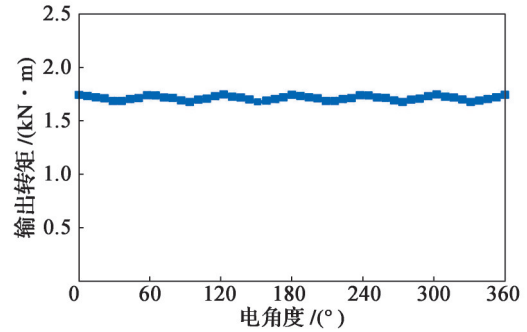
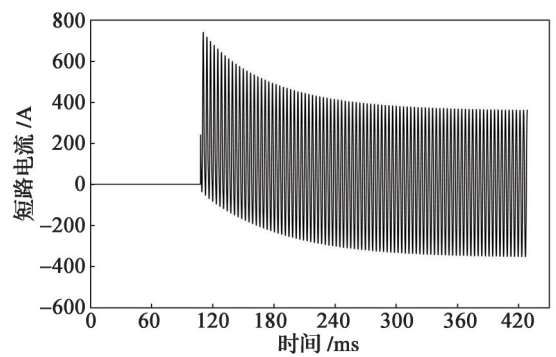


图7 正常工况下电机的输出转矩

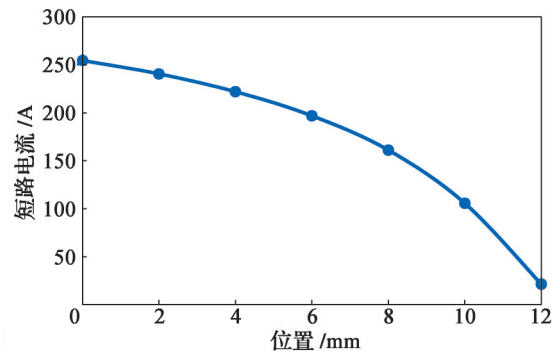
Fig. 7 Output torque of motor under normal conditions

4 故障导向安全性能研究

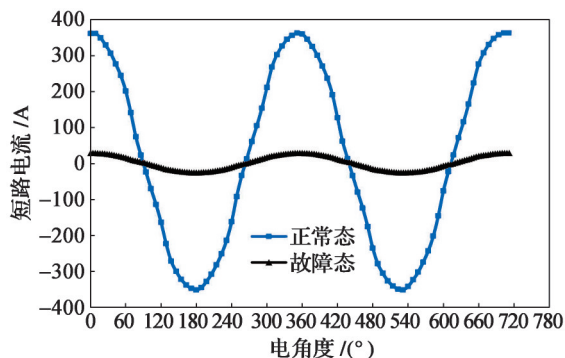
故障导向安全是轨道交通牵引系统的重要设计原则,尤其是永磁同步电机,需确保故障发生时系统能自动切换至安全状态,避免热崩溃、机械共振或永磁体失磁等连锁风险。为验证磁通可调永磁同步电机在稳定运行时突发三相短路故障后的故障导向安全性能,建立了外电路模拟故障,对滑动磁桥动作和未动作情况下电机的输出性能进行了分析。电机短路电流的相关变化波形如图8所示。



(a) 故障短路电流



(b) 不同滑动磁桥位置短路电流有效值



(c) 稳态值

图8 磁通可调永磁同步电机的短路电流

Fig. 8 Short-circuit current of FA-PMSM

图8(a)为磁通可调永磁同步电机的短路电流波形,电机正常工作时无相间电流;三相短路故障发生后,绕组的相间电压不平衡,因此出现相间短路电流,该电流随时间推移逐渐趋于稳定。磁桥未动作时,稳态短路电流为254 A,约为额定电流的1.5倍。由于电机的短路电流与永磁磁链成正比、与直轴电感成反比,滑动磁桥动作后,在电机主磁通降低的同时直轴电感增加,因此电机的相间短路电流随着滑动磁桥位置的变化呈下降趋势,且磁桥行程由8 mm增加到12 mm阶段的短路电流降幅最大,变化曲线如图8(b)所示。图8(c)为电机处于三相反拖工况时电机短路电流的稳态值对比情况,由该图可知,滑动磁桥滑动行程结束后电机相间短路电流为19.23 A,与磁桥初始位置的电流值相比下降了约92.4%,证明磁通可调永磁电机的相间短路环流大幅降低。

磁通可调永磁同步电机三相反拖工况下的稳态损耗分布如图9所示。由图9可知,短路环流的大幅降低使得磁桥动作后故障态电机的铜耗 P_{Cu} 仅为动作前的0.57%;磁桥短路了绝大部分主磁通,电机永磁磁场被大幅削弱,各部分磁密均下降,故障态电机铁耗 P_{Fe} 和永磁体涡流损耗 P_{mag} 仅为0.03 kW和0.01 kW。因此,磁桥动作后电机各部分损耗均显著降低,电机故障运行时的热稳定性提高。

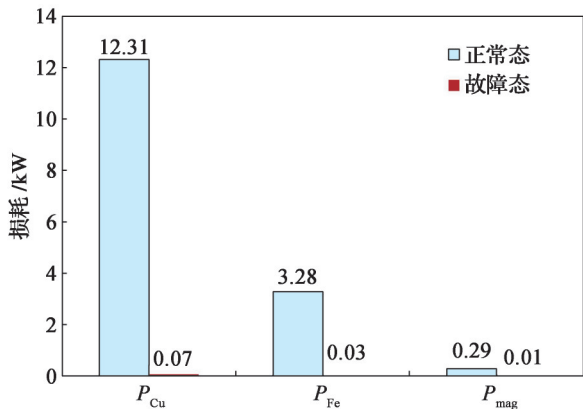
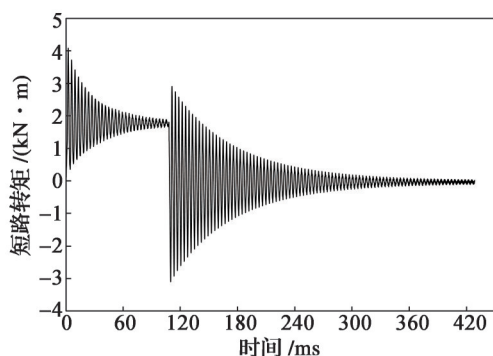


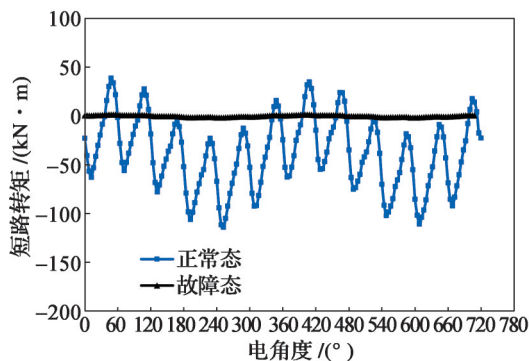
图9 不同状态下电机三相反拖工况稳态损耗

Fig. 9 Steady-state losses of motor under three-phase reverse-driving conditions in different states

除热稳定性外,电机的机械稳定性同样是实现故障导向安全的关键,旨在确保故障发生后能够平稳停车而非继续输出动力。鉴于转矩脉动与振动之间存在强相关性,可将转矩脉动作为评估振动风险的间接指标。由图10可知,故障短路输出转矩变化波形随时间延长逐渐趋于稳定,漏磁阻的减小削弱了电机的永磁磁场,同时降低了各绕组内的短路电流,使输出转矩的脉动大幅下降。磁桥动作后,转矩峰峰值由152.86 N·m降至3.17 N·m,约降低至2%,有效降低了电机在停车过程中受到的机械冲击,提高了电机运行的机械稳定性。



(a) 故障短路转矩



(b) 不同滑动磁桥位置短路转矩脉动

图10 磁通可调永磁电机短路转矩

Fig. 10 Short-circuit torque of FA-PMSM

5 结束语

为提高永磁同步牵引电机的运行可靠性,确保故障工况下的热稳定性和机械稳定性,本文提出了一种基于滑动磁桥的磁场可调永磁同步电机拓扑。该拓扑通过控制滑动磁桥的工作状态,可在保障电机正常输出能力的同时,在故障发生时能调节其气隙,有效削弱永磁磁场并提升直轴电感。这一方案显著降低了故障运行时的短路电流、输出转矩及损耗,提升了电机的热稳定性和机械稳定性。本文研究基于典型的三相短路故障开展仿真分析,验证了引入滑动磁桥可实现电机故障导向安全设计的可行性。后续工作将重点围绕两个方向:一是滑动磁桥工作位置的多级精确控制,

以期实现电机磁场的连续调节;二是深入探究在不对称故障(如匝间短路)条件下,转子不平衡电磁力对滑动机构动态特性与长期可靠性的影响,并通过样机试验验证其抗冲击与防卡滞性能。

参考文献:

- [1] 吴冬华, 孙传铭. 基于永磁电机牵引系统高速动车组的研制[J]. 机车电传动, 2019(1): 35-39.
WU Donghua, SUN Chuanming. Development of high-speed EMUs based on permanent magnet motor traction system[J]. Electric drive for locomotives, 2019(1): 35-39.
- [2] 许峻峰, 李耘龙, 许建平. 永磁同步电机作为机车牵引电机的应用现状及前景[J]. 铁道学报, 2005(2): 130-132.
XU Junfeng, LI Yunlong, XU Jianping. The current situation and prospects of permanent magnet synchronous motors applied as tractive motors for rail vehicles[J]. Journal of the China railway society, 2005(2): 130-132.
- [3] 唐林. 永磁同步电机牵引系统在成都地铁上的应用优化方案研究[J]. 机车电传动, 2019(1): 45-50.
TANG Lin. Study on application and optimizing scheme of permanent magnet synchronous motor traction system in Chengdu metro[J]. Electric drive for locomotives, 2019(1): 45-50.
- [4] 邹焕青, 刘闰婵, 张萌, 等. 轨道交通牵引电机典型故障的电磁特征分析[J]. 微电机, 2025, 58(3): 1-9.
ZOU Huanqing, LIU Runchan, ZHANG Meng, et al. Analysis of electromagnetic characteristics of typical faults of traction motor for rail transit[J]. Micromotors, 2025, 58(3): 1-9.
- [5] 戴计生, 胡德安, 徐海龙, 等. 基于深度高斯过程的永磁牵引电机匝间短路分级评估方法[J]. 机车电传动, 2024(2): 108-117.
DAI Jisheng, HU Dean, XU Hailong, et al. Grading evaluation method for inter-turn short circuit of permanent magnet traction motor based on deep Gaussian processes[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 108-117.
- [6] 王仁庆, 陈柳松, 杨利, 等. 地铁列车牵引系统短路故障仿真研究[J]. 机车电传动, 2018(6): 89-92.
WANG Renqing, CHEN Liusong, YANG Li, et al. Simulation research on short-circuit fault of metro drive system[J]. Electric drive for locomotives, 2018(6): 89-92.
- [7] 耿民, 秦嘉翼, 刘明杰, 等. 基于阶跃激励响应的牵引电机定子早期匝间短路故障诊断方法[J]. 机车电传动, 2024(2): 158-164.
GENG Min, QIN Jiayi, LIU Mingjie, et al. Diagnosis of early turn-to-turn short-circuit faults of traction motor stators based on step excitation response[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 158-164.
- [8] 寇宝泉, 赵晓坤, 张浩泉, 等. 永磁同步电机电磁结构及磁场调节技术的综述分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7126-7140.
KOU Baoquan, ZHAO Xiaokun, ZHANG Haoquan, et al. Review and analysis of electromagnetic structure and magnetic field regulation technology of the permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7126-7140.
- [9] 沈月芬. 基于多齿开关磁链永磁记忆电机的等效磁路模型与永磁体优化[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
SHEN Yuefen. Equivalent magnetic circuit model and permanent magnet optimization of multi-link switched reluctance permanent magnet memory motor[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.
- [10] 阳辉, 刘兴, 吕舒康, 等. 变磁通记忆电机非线性模型与调磁电流脉冲轨迹优化研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5128-5140.
YANG Hui, LIU Xing, LYU Shukang, et al. Research on nonlinear mathematical model and improvement of re-/de-magnetization current pulse trajectories for variable flux memory machine[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(19): 5128-5140.
- [11] 陈益广, 王颖, 沈勇环, 等. 宽调速可控磁通永磁同步电机磁路设计和有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 157-161.
CHEN Yiguang, WANG Ying, SHEN Yonghuan, et al. Magnetic circuit design and finite element analysis of wide-speed controllable-flux PMSM[J]. Proceedings of the Chinese society for electrical engineering, 2005, 25(20): 157-161.
- [12] 刘细平, 章超, 陈栋, 等. 机械变磁通永磁同步电机发展综述[J]. 江西理工大学学报, 2014, 35(3): 37-46.
LIU Xiping, ZHANG Chao, CHEN Dong, et al. An overview of variable flux permanent magnet synchronous motor with mechanical device[J]. Journal of Jiangxi university of science and technology, 2014, 35(3): 37-46.
- [13] CARICCHI F, CRESCIMBINI F, CAPPONI F G, et al. Permanent-magnet, direct-drive, starter/alternator machine with weakened flux linkage for constant-power operation over extremely wide speed range[C]//IEEE. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. Chicago: IEEE, 2001: 1626-1633.
- [14] 刘细平, 肖娟娟, 徐慧, 等. 磁极旋转式新型变磁通永磁同步电机弱磁性能分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3182-3190.
LIU Xiping, XIAO Juanjuan, XU Hui, et al. Analysis of flux weakening performance of a novel variable flux permanent magnet synchronous machine with rotating magnetic pole [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(15): 3182-3190.

[15] 寇宝泉, 赵晓坤. 反凸极永磁同步容错电机的短路特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6716-6725.
KOU Baoquan, ZHAO Xiaokun. Short circuit characteristic analysis of negative-salient permanent magnet synchronous fault-tolerant machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6716-6725.

Research on mechanical flux weakening performance of permanent magnet synchronous motors based on sliding magnetic bridges

DUAN Rong^{1,2}, HOU Xiaojun^{1,2}, PANG Cong^{1,2}, WU Nan^{1,2}, NI Wei^{1,2}, ZHANG Sha^{1,2}

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji, Shanxi 044502, China;
2. Shanxi Key Laboratory of Traction Motor for Rail Transit, Yongji, Shanxi 044502, China)

Abstract: To address the increased heating and vibration caused by the inability to regulate the magnetic field of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) used in rail transit under fault conditions, this paper proposes a magnetic-field-adjustable PMSM based on a sliding magnetic bridge according to the fault-oriented safety principle. The motor's topological transformation was used to realize the traction motor torque output under normal conditions and the magnetic field regulation under fault conditions. The influence of the rotor leakage reluctance on the motor flux linkage and *d*-axis inductance was analyzed, and the regulation effect of the sliding magnetic bridge's operating position on the permanent magnet flux linkage was investigated. Consequently, the fault current and the operating torque ripple were effectively reduced. The results demonstrate that the proposed motor ensures the motor output, weakens the main flux and increases the *d*-axis inductance through topological transformation, and reduces the fault current and drag torque ripple, thus mitigating the electromagnetic losses and mechanical vibrations during fault operation and achieving a fault-oriented safety design for the motor.

Keywords: rail transit; permanent magnet synchronous motor; sliding magnetic bridge; magnetic-field-adjustable; fault current; fault-oriented safety