DOI:10.12177/emca.2026.239 文章编号:1673-6540(2026)11-1181-10 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

考虑退磁效应的永磁同步电机匝间短路故障性能影响机理研究

王天阳, 李 明*, 伦淑娴
(渤海大学 控制科学与工程学院,辽宁 锦州 121210)

Study on the Influence Mechanism of Inter-turn Short Circuit Fault on Performance of Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Demagnetization Effect

Wang Tianyang, Li Ming*, Lun Shuxian
(School of Control Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121210, China)

Abstract: **[Objective]** Permanent magnet synchronous motor (PMSM) is prone to stator winding inter-turn short circuit faults under complex operating conditions, which may further trigger permanent magnet demagnetization and severely degrade the motor performance. This paper aims to reveal the influence law of inter-turn short circuit fault on the electromagnetic field and performance parameters of PMSM considering demagnetization effects. **[Methods]** A 1.5 kW PMSM was taken as the research object, and an external circuit-finite element coupled calculation model was established. The inter-turn short circuit parameters were introduced into the external circuit to build the faulty winding model. By solving the distribution of short circuit current, the influence of short circuit fault on the demagnetization degree of permanent magnets was analyzed. On this basis, the variation laws of performance parameters including air gap flux density, induced electromotive force, motor losses, electromagnetic torque and efficiency were investigated. **[Results]** With the increase of short circuited turns, the local demagnetization effect of permanent magnets induced by short circuit current was significantly aggravated, and the air gap flux density waveform was distorted, with its fundamental amplitude decreasing from 0.81 T to 0.74 T. Meanwhile, the unbalance of stator current deteriorated continuously. The copper loss rose from 42.47 W to 356.75 W, while the iron loss decreased from 30.06 W to 25.82 W, leading to an overall increase in total loss. The electromagnetic torque increased from 1.61 N·m to 2.24 N·m, and the motor full-load efficiency dropped from 92.77% to 82.56%. **[Conclusion]** Inter turn short circuits induce permanent magnet demagnetization via short circuit current, which is a key factor causing the distortion of electromagnetic field distribution and performance degradation of PMSM. As the fault severity increases, the coupling effect between demagnetization and current distortion is continuously strengthened, eventually resulting in increased losses, torque attenuation and reduced efficiency of the PMSM.

Key words: permanent magnet synchronous motor; inter-turn short circuit; operating performance; demagnetization effect

摘 要:**【目的】**永磁同步电机(PMSM)在复杂工况下易发生定子绕组匝间短路故障,并进一步诱发永磁体退磁,严重影响其运行性能。本文旨在揭示考虑退磁效应时,匝间短路故障对 PMSM 电磁场及性能参数的影响规律。**【方法】**以一台 1.5 kW PMSM 为研究对象,建立外电路—有限元耦合计算模型,在外电路中引入匝间短路参数,搭建故障绕组模型;通过求解短路电流分布,分析短路故障对永磁体退磁程度的影响,并在此基础上研究气隙磁密、感应电动势、电机损耗、电磁转矩及效率等性能参数的变化规律。**【结果】**随着短路匝数增加,短路电流诱发的局部退磁效应显著加剧,气隙磁密波形产生畸变,其基波幅值由 0.81 T 降至 0.74 T;同时电流不平衡程度加剧,铜耗由 42.47 W 增至 356.75 W,铁耗由 30.06 W 降至 25.82 W,电机总损耗呈上升趋势;电磁转矩由 1.60 N·m 增至 2.24 N·m;电机满载效率由 92.77%降至 82.56%。**【结论】**匝间短路通过短路电流诱发永磁体退磁,是造成 PMSM 电磁场分布畸变及性能劣化的关键因素;随着短路程度加深,退磁效应与电流畸变之间的耦合效应不断增强,最

基金项目:辽宁省博士科研启动基金(2025-BS-0809)
Doctoral Research Startup Foundation of Liaoning Province, China (2025-BS-0809)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

终导致 PMSM 损耗增加、转矩下降及效率降低。
关键词:永磁同步电机;匝间短路;运行性能;退磁效应

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有效率高、功率密度高、调速性能优及控制精度高的特点[1-2],被广泛应用于工业驱动、电动交通及航空航天等领域[3-4]。随着对装备运行可靠性要求的日益提高,复杂工况下 PMSM 的故障机理与性能演化规律愈发受到关注[5-6]。

在各类故障中,定子绕组匝间短路具有隐蔽性强、发展速度快的特点,是影响电机安全运行的典型电气故障之一[7-8]。发生匝间短路时,故障绕组中产生较大环流[9-10],不仅导致局部温升显著增加[11],加速绝缘老化[12],还可能扩展故障范围,进而影响整个电机系统的稳定运行[13]。因此,深入分析匝间短路故障下电机电磁特性变化规律,对于故障机理分析及后续诊断具有重要意义。

针对 PMSM 匝间短路问题,国内外学者开展了大量研究,且主要集中于短路匝数、绕组结构及接触电阻等因素对故障严重程度的影响。文献[14]分析了并联支路结构对故障发展的抑制作用。文献[15]探讨了接触电阻对短路电流及故障程度的影响机制。文献[16-17]基于有限元法,对不同相数及结构形式下的匝间短路特性进行了系统分析,并结合试验验证了相关模型的有效性。文献[18-19]提出了匝间短路与局部退磁的分类识别方法。

现有研究多侧重于匝间短路或永磁体退磁单一故障对电机电流、电压及转矩等外特性的影响。关于匝间短路故障所引发的永磁体退磁及其耦合效应对电机性能的影响的相关研究相对较少。实际上,匝间短路产生的大电流会在电机内部形成附加去磁磁场,该磁场可能对永磁体产生不可逆影响,从而引发局部退磁现象。进一步地,退磁将改变气隙磁场分布,并对电机损耗、转矩及效率等关键性能参数产生持续影响。因此,从“匝间短路—退磁—性能演化”的角度开展系统分析,对于全面认识电机故障发展过程具有重要意义。基于此,本文针对 PMSM 匝间短路引发的退磁效应,建立了考虑匝间短路的电机电磁模型,通过求解短路电流并引入退磁分析方法,研究了不同短路匝数下永磁体的退磁特性。在此基础上,进一步分析了退磁对气隙磁密、电流分布、损耗及转矩等性能参数的影响。研究结果可为 PMSM 匝间短路故障机理分析及性能评估提供理论依据。

1 匝间短路与退磁耦合分析方法

1.1 研究方法总体框架

为分析 PMSM 匝间短路故障引发的退磁效应及其对电机性能的影响,本文采用外电路—有限元耦合的分析方法,构建考虑退磁效应的电机电磁计算模型。具体计算流程如下。

(1)在电机外电路中引入匝间短路支路,设置短路匝数及接触电阻,构建不同故障程度的电路模型;

(2)求解外电路与电磁场耦合方程,获得各相绕组电流及短路电流;

(3)基于电流分布计算电机内部磁场,分析短路电流产生的附加去磁磁场;

(4)根据永磁体工作点变化判断退磁程度,并更新永磁体磁性能参数;

(5)在考虑退磁的条件下,计算电机气隙磁密、损耗及转矩等性能参数。

1.2 匝间短路外电路模型

为模拟定子绕组匝间短路故障,在外电路中对故障相绕组进行等效建模,将其划分为有效绕组与短路绕组两部分。其中,有效绕组参与正常能量转换;短路绕组通过接触电阻形成闭合回路,产生短路电流。

PMSM A 相绕组发生匝间短路的外电路如图 1 所示。图中,V_A、V_B、V_C 和 I_A、I_B、I_C 分别为 A、B、C 相相电压和相电流;L_A、L_B、L_C 为三相绕组电感;R_b、R_c 分别为 B、C 相绕组的相电阻;L_b、L_c 分别为 B、C 相绕组的端部漏感;R_{ah}、L_{ah} 和 R_{af}、L_{af} 分别为 A 相绕组短路后有效绕组和短路绕组的电阻、端部漏感;R_f 为匝间短路接触电阻,取值为 R_{af} 的 $1/10$[20]。

设短路匝数为 N_1,每相总匝数为 N,定义短路匝比 k 为

$$k = \frac{N_1}{N} \tag{1}$$

基于匝数比关系,对故障相绕组的电阻与电感参数进行重构,使其分别对应有效绕组与短路

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

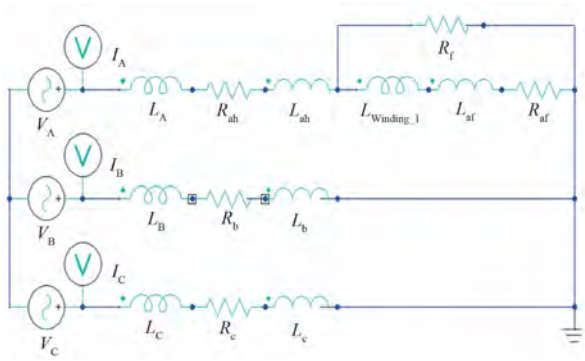


图 1　PMSM 匝间短路外电路

Fig. 1　External circuit of PMSM with inter-turn short circuit

绕组。通过调节短路匝数及接触电阻，可实现不同严重程度匝间短路故障的建模。外电路中各参数与匝数比的关系为[21-22]

$$\begin{cases} L_{af} = k^2 \cdot L_a \\ R_{af} = k \cdot R_a \\ L_{ah} = (1-k)^2 \cdot L_a \\ R_{ah} = (1-k) \cdot R_a \end{cases} \tag{2}$$

式中：R_a、L_a 分别为 A 相未发生匝间短路故障时的相电阻、自感。

1.3　有限元模型与耦合计算方法

在外电路模型的基础上，建立 PMSM 二维有限元模型，用于求解电机内部电磁场分布。将外电路模型与有限元模型耦合，实现电流与磁场的双向关联计算。本文以一台额定功率为 1.5 kW 的 PMSM 为研究对象，其基本参数如表 1 所示。

表 1　PMSM 基本参数

Tab. 1　Basic parameters of PMSM

参数名称	参数值
额定转速/(r·min^{-1})	9 000
每相匝数	150
相电阻/Ω	0.33
相电感/mH	0.1
永磁体厚度/mm	4
额定功率/kW	1.5

为确保仿真结果更接近实际工况，对有限元模型的边界条件、网格剖分及时间步长进行设置。

(1)将定子外圆设置为矢量零边界，抑制外部漏磁效应；

(2)采用手动网格剖分方法，以满足匝间短路故障下的磁场求解精度要求；

(3)设定与电频率相匹配的时间步长，实现一个电周期内电磁参数动态过程的完整表征，时间步长设定为 4.44×10^{-5} s。

根据表 1 所示的参数建立 PMSM 匝间短路故障模型，如图 2 所示。

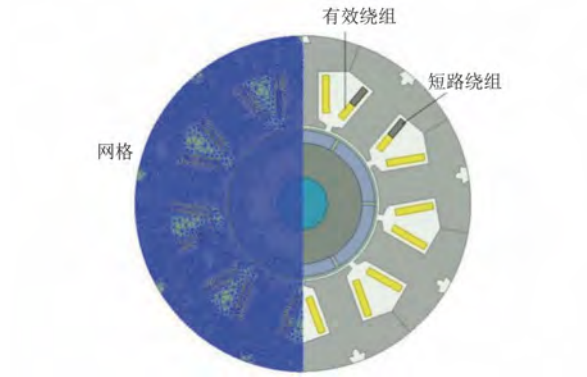


图 2　PMSM 匝间短路故障模型

Fig. 2　Inter-turn short circuit fault model of the PMSM

假定 A 相绕组发生匝间短路故障，本文基于外电路与有限元耦合模型，对电机正常工况及不同短路程度工况进行对比分析。通过设置 k 为 0、0.2、0.4 和 0.6(即短路匝数分别为 0 匝、30 匝、60 匝和 90 匝)，对应 A 相绕组发生不同程度的匝间短路故障，并开展有限元仿真计算。

根据式(2)计算各工况下短路绕组参数，得到不同短路匝比下的等效电阻与电感，如表 2 所示。其中，B 相和 C 相绕组未发生故障，其电阻与电感参数保持不变。

表 2　PMSM 匝间短路绕组参数

Tab. 2　Winding parameters of PMSM with inter-turn short circuit

参数名称	短路 30 匝	短路 60 匝	短路 90 匝
R_{ah}/mΩ	290	260	220
R_{af}/mΩ	40	70	110
L_{ah}/μH	79	61	45
L_{af}/μH	1	5	10
R_f/mΩ	4	7	11

2　匝间短路及退磁效应对电机电磁场的影响

2.1　不同短路匝数下电流特性分析

为分析匝间短路对 PMSM 电流特性的影响，

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

选取电机正常运行及 A 相绕组分别发生 30 匝、60 匝和 90 匝匝间短路三种故障工况进行对比分析。A 相有效绕组电流和故障绕组电流分别如图 3、图 4 所示。

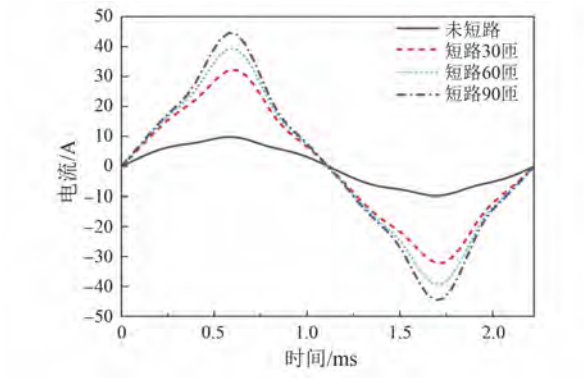


图 3　A 相有效绕组电流

Fig. 3　Effective winding currents of phase A

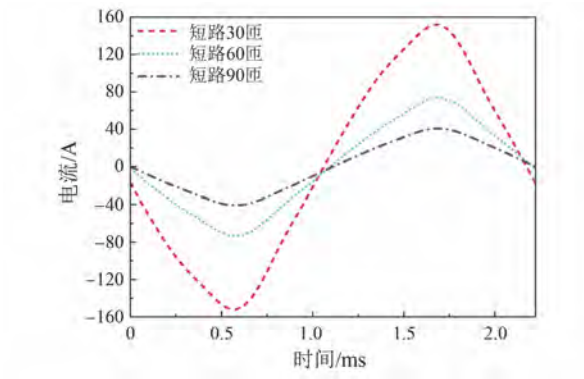


图 4　A 相故障绕组电流

Fig. 4　Faulty winding currents of phase A

由图 3 和图 4 可知,随着短路匝数的增加,故障绕组电流幅值逐渐减小,有效绕组电流逐渐增大。这是由于匝间短路发生后,故障绕组中形成局部闭合回路,短路支路对主电流产生分流作用。随着短路匝数增加,短路回路等效阻抗降低,电流分配更加不均匀,导致更多电流流经健康绕组,而故障支路电流反而下降。此外,三相电流对称性随短路程度加剧而逐渐恶化,表明电机运行状态由对称工况向不对称工况转变。上述电流变化特性为后续电磁场畸变及永磁体退磁分析提供了基础。

2.2　永磁体退磁特性分析

将不同短路匝数下的绕组电流作为激励加载至有限元模型中,对永磁体工作状态进行分析,得到永磁体退磁分布情况。为了描述永磁体退磁程度,引入退磁率 *Demag_coef*,其表达式为[23]

$$Demag_coef = \frac{B_{r1}}{B_{r0}} \tag{3}$$

式中:B_{r0} 为永磁体固有剩磁;B_{r1} 为永磁体退磁后的剩磁。

$Demag_coef \in [0, 1]$。$Demag_coef = 1$ 表明永磁体没有退磁;$Demag_coef = 0$ 表明永磁体已完全退磁[24]。

电机正常运行及 A 相绕组分别发生 30 匝、60 匝和 90 匝匝间短路时,永磁体退磁率分布如图 5 所示。

由图 5 可知,匝间短路会造成永磁体边缘出现局部退磁,且随短路匝数增加,退磁区域逐步扩大,退磁程度不断加剧。正常运行时永磁体退磁率为 0.99,短路 90 匝时永磁体退磁率为 0.59。这是由于短路电流产生的去磁磁场在局部区域不断增强,使永磁体工作点偏离原有磁化状态。短路电流产生的去磁磁动势 F_{sc} 可表示为

$$F_{sc} = I_{sc}N_1 \tag{4}$$

式中:I_{sc} 为短路电流。

F_{sc} 在 d 轴上的分量 F_{dsc} 为

$$F_{dsc} = I_{sc}N_1\cos\theta \tag{5}$$

式中:θ 为短路绕组磁动势轴线与永磁体 d 轴的夹角。

由去磁磁动势引起的永磁体磁场强度偏移量 ΔH_m 可表示为

$$\Delta H_m = \frac{F_{dsc}}{h_m + \mu_{rec}\delta_e} \tag{6}$$

式中:h_m 为永磁体厚度;δ_e 为等效气隙长度;μ_{rec} 为回复磁导率。

永磁体在线性回复线满足:

$$B_m = B_{r0} + \mu_0\mu_{rec}H_m \tag{7}$$

式中:H_m、B_m 分别为永磁体 *B-H* 曲线上不可逆退磁区域内任一点的横、纵坐标;μ_0 为真空磁导率。

因此,永磁体的磁通密度偏移量 ΔB_m 为

$$\Delta B_m = \mu_0\mu_{rec}\Delta H_m \tag{8}$$

为确立永磁体可逆与不可逆退磁[25]的临界阈值,在拐点下方取一个参考点 $P(H_P, B_P)$,该点紧邻永磁体材料的拐点,在理论分析中认为其与拐点无限接近。本文选取永磁体材料为 N38UH,真空磁导率为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m,相对磁导率为 1.043,剩磁为 1.23 T。计算得到参考点回复剩磁

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

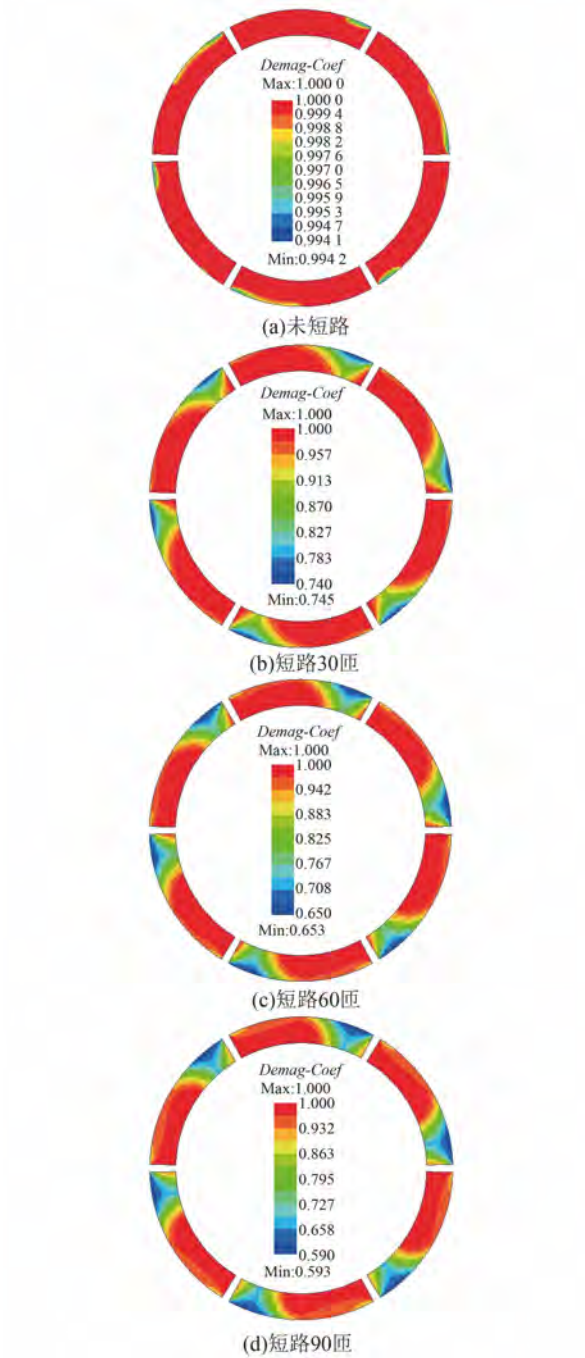


图 5　永磁体退磁率云图

Fig. 5　Cloud map of permanent magnet demagnetization rate

B_{rP} 为 0.89 T，即退磁率≤0.72 时，永磁体进入不可逆退磁阶段。

2.3　气隙磁密特性分析

气隙磁密是反映电机电磁性能的重要参数。不同短路工况下 PMSM 气隙磁密波形及其谐波成分如图 6 所示。

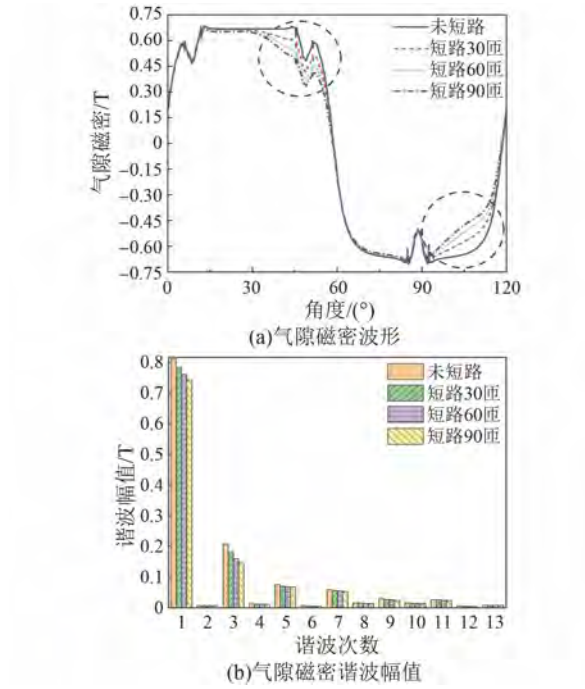


图 6　不同短路工况下的气隙磁密波形及谐波成分

Fig. 6　Air gap flux density waveforms and harmonic components under different short circuit conditions

由图 6(a)可知，随着定子绕组短路匝数的增加，气隙磁密波形逐渐发生畸变，原有对称性被破坏，且局部区域磁密幅值被削弱。由图 6(b)可知，气隙磁密基波幅值随短路程度增加呈下降趋势。对比正常工况与 A 相绕组短路 90 匝工况，气隙磁密基波幅值由 0.81 T 降低至 0.74 T，降幅为 8.64%。说明匝间短路电流所引发的退磁效应显著削弱了电机气隙主磁通，从而降低了电机的电磁能量转换能力。

不同短路工况下的感应电动势波形如图 7 所示。

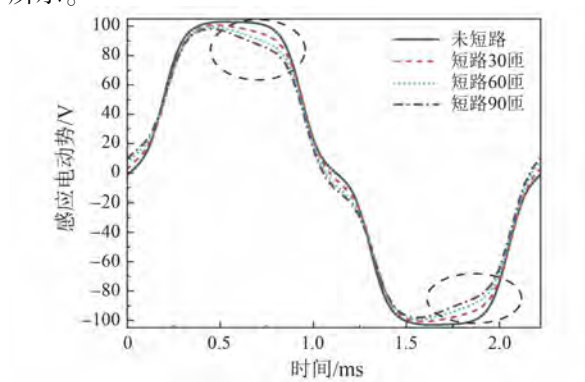


图 7　不同短路工况下的感应电动势波形

Fig. 7　Back electromotive force waveforms under different short circuit conditions

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

由图 7 可知,随着短路匝数的增加,感应电动势幅值逐渐降低,波形畸变程度加剧。这是由于气隙磁密基波幅值衰减,削弱了感应电动势的基波分量,导致感应电动势正弦度降低、谐波畸变率上升。此外,电磁场分布的不对称性也使感应电动势波形中谐波成分增加。感应电动势的变化趋势与气隙磁密保持一致,进一步验证了匝间短路及退磁效应对电机电磁场的削弱作用。

3 匝间短路及退磁效应对电机电磁性能的影响

3.1 损耗特性分析

电机运行过程中的主要损耗包括铁心损耗与绕组铜耗。其中,铁心损耗主要由磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗构成[27],其表达式为[28]

$$\begin{cases} P_{\mathrm{Fe}} = P_{\mathrm{h}} + P_{\mathrm{c}} + P_{\mathrm{e}} \\ P_{\mathrm{h}} = K_{\mathrm{h}} f (B_{\mathrm{m}})^2 \\ P_{\mathrm{c}} = K_{\mathrm{c}} (fB_{\mathrm{m}})^2 \\ P_{\mathrm{e}} = K_{\mathrm{e}} (fB_{\mathrm{m}})^{1.5} \end{cases} \tag{9}$$

式中:P_{Fe} 为铁心损耗;P_{h}、P_{c} 和 P_{e} 分别为磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗;K_{h}、K_{c} 和 K_{e} 分别为磁滞损耗系数、涡流损耗系数和附加损耗系数;f 为交变频率。

在有限元模型中设置材料损耗参数,对不同短路工况下的铁心损耗进行计算,结果如图 8 所示。

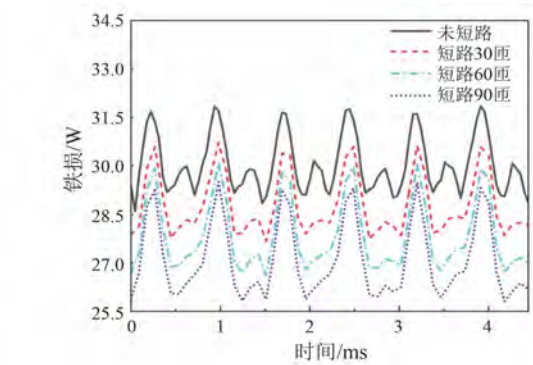


图 8 不同短路工况下的铁心损耗

Fig. 8 Core loss under different short circuit conditions

对图 8 中各工况稳态区间取平均值得到正常工况下铁耗为 30.06 W;短路 90 匝时,铁耗降低至 25.82 W。这是因为匝间短路引发的永磁体退磁效应导致气隙磁密幅值降低,感应电动势减小,铁心中磁通密度下降,而铁耗与磁通密度密切相关。其中,磁滞损耗与磁通密度近似成正比,涡流损耗与磁通密度平方成正比,因此磁通密度下降直接导致铁耗减小。

PMSM 正常运行状态下的绕组铜耗表达式为[29]

$$P_{\mathrm{Cu}} = mI^2R \tag{10}$$

式中:P_{Cu} 为绕组铜耗;m 为电机相数;I 为相电流有效值;R 为相电阻。

短路故障下,电机总铜耗可表示为故障相短路绕组铜耗、故障相有效绕组铜耗以及非故障相绕组铜耗之和,其表达式为

$$P_{\mathrm{Cu1}} = I_1^2R_1 + I_2^2R_2 + I_3^2R \tag{11}$$

式中:P_{Cu1} 为电机短路时的铜耗;I_1、R_1 分别为故障相有效绕组电流、电阻;I_2、R_2 分别为故障相短路绕组电流、电阻;I_3 为非故障相绕组电流。

不同短路工况下的 PMSM 铜耗如表 3 所示。

表 3 不同短路工况下的 PMSM 铜耗

Tab. 3 Copper loss of PMSM under different short circuit conditions

短路工况	短路绕组铜耗/W	有效绕组铜耗/W	非故障相绕组铜耗/W	总铜耗/W
未短路	0	14.16	28.31	42.47
短路 30 匝	398.56	109.71	93.62	601.89
短路 60 匝	156.48	136.22	117.93	410.63
短路 90 匝	77.25	141.59	137.91	356.75

由表 3 可知,随着短路匝数增加,PMSM 总铜耗呈先升后降趋势。未短路时,总铜耗为 42.47 W,短路 30 匝时增至 601.89 W;然后,随着短路匝数增加铜耗逐渐减小,短路 90 匝时为 356.75 W。其原因在于,短路初期,短路电流骤增,导致铜耗急剧上升;随着短路匝数增加,短路电流逐渐减小,短路绕组铜耗的下降幅度超过故障相有效绕组铜耗与非故障相绕组铜耗的上升幅度,总铜耗先升后降。

综合来看,虽然退磁使铁耗有所降低,但铜耗的增幅更大,导致电机总损耗上升。

3.2 电磁转矩特性分析

电磁转矩是表征电机输出能力的重要指标。不同短路工况下的电磁转矩波形如图 9 所示。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

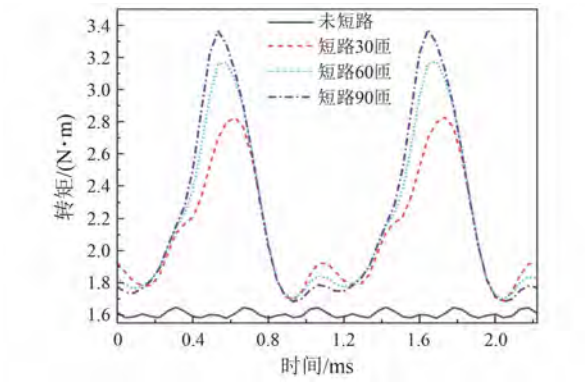


图 9　不同短路工况下的电磁转矩

Fig. 9　Electromagnetic torque under different short circuit conditions

由图 9 可知，PMSM 发生匝间短路故障后，电磁转矩明显升高。为了定量分析转矩升高的机理，对电流增量与永磁体退磁产生的转矩变化量进行计算。

表贴式 PMSM 电磁转矩表达式为[30]

$$T = \frac{3}{2}p\psi_f i_q \tag{12}$$

式中：T 为电磁转矩；p 为极对数；ψ_f 为定子磁链；i_q 为 q 轴电流。

当电机定子绕组发生匝间短路后，电磁转矩可表示为

$$T_1 = \frac{3}{2}p(i_{q0} + \Delta i_q)(\psi_{f0} - \Delta\psi_f) \tag{13}$$

式中：i_{q0}、ψ_{f0} 分别为未短路时电机的 q 轴电流、磁链；Δi_q、$\Delta\psi_f$ 分别为短路后 q 轴电流增量、磁链增量。

将短路后的电磁转矩与未短路时的电磁转矩作差，得到转矩变化量 ΔT 为

$$\Delta T = T_1 - T_0 = \Delta T_{inc} - \Delta T_{dec} \tag{14}$$

$$\begin{cases} \Delta T_{inc} = \dfrac{3}{2}p\psi_{f0}\Delta i_q \\ \Delta T_{dec} = \dfrac{3}{2}p\Delta\psi_f(i_{q0} + \Delta i_q) \end{cases} \tag{15}$$

式中：ΔT_{inc} 和 ΔT_{dec} 分别为匝间短路电流产生的转矩增益和永磁体退磁削弱的转矩。

不同短路工况下，电流增量和永磁体退磁引起的电磁转矩变化量如表 4 所示。

由表 4 可知，随着短路匝数的增加，PMSM 的电磁转矩变化量逐渐增大。相较于未短路工况，短路 90 匝时，电磁转矩由 1.60 N·m 上升至 2.24 N·m，增幅为 0.64 N·m。其主要原因在于发生匝间短路后，故障相与非故障相绕组电流均高于额定电流，而退磁导致的转矩损失小于电流升高带来的转矩增益，因此电磁转矩总体升高。

表 4　不同短路工况下的电磁转矩变化量

Tab. 4　Electromagnetic torque variation under different short circuit conditions

转矩变化量/(N·m)	短路 30 匝	短路 60 匝	短路 90 匝
ΔT_{inc}	0.58	0.72	0.79
ΔT_{dec}	0.06	0.11	0.15
ΔT	0.52	0.61	0.64

3.3　电机效率特性分析

为进一步评估匝间短路及退磁效应对电机整体性能的影响，对不同工况下电机效率进行计算。电机效率 η 定义为[31]

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{16}$$

式中：P_{out}、P_{in} 分别为输出功率、输入功率。

结合输出功率与输入功率可以得到不同短路工况下电机效率的变化规律，同时补充了半载及 1.5 倍负载下的仿真结果，得到 PMSM 退磁前后的效率如表 5 所示。

表 5　不同短路工况下 PMSM 的效率

Tab. 5　Efficiency of PMSM under different short circuit conditions

工况名称		最大退磁率	η/%
半载	未短路	0.99	92.29
	短路 30 匝	0.92	71.29
	短路 60 匝	0.90	69.58
	短路 90 匝	0.89	84.51
满载	未短路	0.99	92.77
	短路 30 匝	0.75	74.34
	短路 60 匝	0.65	80.65
	短路 90 匝	0.59	82.56
1.5 倍负载	未短路	0.95	92.19
	短路 30 匝	0.61	71.68
	短路 60 匝	0.52	78.17
	短路 90 匝	0.48	80.03

由表 5 可知，相同短路匝数下，永磁体最大退磁率随负载增大而降低；不同负载条件下，电机效率均随着短路匝数增加，呈先降后升趋势。其原

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

因是:短路初期短路电流骤增使铜耗急剧上升,效率大幅下降;随着短路匝数增加,短路电流减小,铜耗回落,效率有所回升。同时,永磁体退磁持续削弱气隙磁密,输出功率下降,限制了效率的回升幅度。二者共同作用,使效率先降后升,但始终低于未短路工况。

由于匝间短路故障冲击电流大、破坏性强,且退磁不可逆,难以在同一台样机上重复开展多工况试验。受限于试验条件,本文暂未进行样机故障测试。后续拟搭建 1.5 kW PMSM 试验平台,通过绕组抽头模拟不同短路匝数,测量短路电流、温升及感应电动势,与仿真结果对比验证模型有效性。

4 结语

本文针对 PMSM 匝间短路引发的永磁体退磁问题,建立了考虑退磁效应的匝间短路模型,进行了耦合仿真分析,并探究了退磁效应对电机电磁特性及运行性能的影响规律,得到如下结论。

(1)随着短路匝数增加,三相绕组电流不平衡程度显著增大,非故障相绕组电流升高、故障相有效绕组电流降低;同时,短路电流产生的去磁磁场持续作用于永磁体,导致局部退磁程度不断加深并呈扩展趋势。

(2)在退磁效应与故障电流畸变的共同作用下,电机气隙磁密波形发生明显畸变,基波幅值及谐波幅值均随短路匝数增加而减小,且谐波分量衰减幅度更为显著,反映出电磁场强度削弱与畸变程度加剧的耦合特性。

(3)受气隙磁场削弱与电流不平衡影响,电机铁耗随短路匝数增加而减小,而铜耗呈增加趋势且增幅更大,导致总损耗上升;电磁转矩因绕组电流升高而上升,运行效率大幅下降。对比正常工况与短路 90 匝工况,铁耗由 30.06 W 降低至 25.82 W,总铜耗由 42.47 W 增加至 356.75 W,总损耗整体上升;电磁转矩由 1.60 N·m 增至 2.24 N·m,满载效率由 92.77% 降至 82.56%。匝间短路及其诱发的永磁体退磁效应会显著劣化电机整体运行性能。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

王天阳和李明进行了方案设计、内容总结与论文撰写,王天阳进行了试验研究,李明、伦淑娴参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Wang Tianyang and Li Ming. The experiment was conducted by Wang Tianyang. The manuscript was reviewed and revised by Li Ming, Lun Shuxian. All authors have read and approved the final version of paper for submission.

参 考 文 献

[1] Shih K J, Hsieh M F, Chen B J, et al. Machine learning for inter-turn short-circuit fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8): 1-7.

[2] Orlowska-Kowalska T, Wolkiewicz M, Pietrzak P, et al. Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives-state of the art and future challenges [J]. IEEE Access, 2022, 10: 59979-60024.

[3] Wei D, Liu K, Hu W, et al. Short-time adaline based fault feature extraction for inter-turn short circuit diagnosis of PMSM via residual insulation monitoring [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(3): 3103-3114.

[4] 李明, 穆海琦, 伦淑娴. 基于正弦气隙磁密设计的 PMCM 性能优化[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(8): 917-923.
Li M, Mu H Q, Lun S X. Performance optimization of permanent magnet canned motors based on sinusoidal air gap flux density design [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(8): 917-923.

[5] 赵希栋, 王玉彬. 气隙偏心分数槽嵌入式永磁同步电机的电磁振动分析[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(7): 732-742.
Zhao X D, Wang Y B. Electromagnetic vibration analysis of fractional-slot interior permanent magnet synchronous motor with air-gap eccentricity [J].

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Electric Machines & Control Application，2025，52(7)：732-742.

[6] 王宇，张成糕，郝雯娟. 永磁电机及其驱动系统容错技术综述[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：351-372.
Wang Y，Zhang C G，Hao W J. Overview of fault-tolerant technologies of permanent magnet brushless machine and its control system [J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(1)：351-372.

[7] 茅宇，杨刘，颜亮亮，等. 基于 VMD 的永磁同步电机初期匝间短路故障检测方法[J]. 电机与控制应用，2022，49(9)：66-74.
Mao Y，Yang L，Yan L L，et al. Detection method of incipient inter-turn short circuit fault of PMSM based on VMD [J]. Electric Machines & Control Application，2022，49(9)：66-74.

[8] Baruti K H，Li C，Erturk F，et al. Online stator inter-turn short circuit estimation and fault management in permanent magnet motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2022，38(2)：1016-1027.

[9] 吴艳国，刘旭. 开关磁链永磁电机匝间短路电流计算及分析[J]. 中国科技论文，2022，17(3)：311-318.
Wu Y G，Liu X. Calculation and analysis of inter-turn short circuit current of switched flux permanent magnet motor [J]. China Science Paper，2022，17(3)：311-318.

[10] 张鹏，赵国新，崔效源，等. 匝间短路故障对永磁同步电机定子侧电流影响分析[J]. 电机与控制应用，2024，51(6)：78-87.
Zhang P，Zhao G X，Cui X Y，et al. Analysis of the effect of inter-turn short-circuit fault on the stator current of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application，2024，51(6)：78-87.

[11] Liu C，Xiao L，Zou J，et al. Analysis and monitoring method for inter-turn short-circuit fault for PMSM [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2023，59(11)：1-6.

[12] Song Q，Wang M，Lai W，et al. On Bayesian optimization-based residual CNN for estimation of inter-turn short circuit fault in PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2022，38(2)：2456-2468.

[13] Chen X，Qin P，Chen Y，et al. Inter-turn short circuit fault diagnosis of PMSM [J]. Electronics，2022，11(10)：1576.

[14] Geng L，Chai F，Pei Y. Mitigation of interturn short circuit fault based on axial split phase permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2022，37(4)：2578-2587.

[15] 谭树清. 同相线圈补偿型轴向永磁同步容错电机匝间短路故障监测方法的研究[D]. 太原：太原理工大学，2023.
Tan S Q. Research on fault monitoring method for in-phase coil compensation type turn-to-turn Short-circuit fault-tolerant axial permanent magnet synchronous motor [D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2023.

[16] Sabna M，Mini V P，Mayadevi N，et al. Inter turn short circuit fault analysis of five-phase PMSM [C]//2021 IEEE 4th International Conference on Computing，Power and Communication Technologies，Kuala Lumpur，Malaysia，2021：1-6.

[17] Liu L，Wang K，Guo L L，et al. Analysis of inter-turn short circuit faults in dual three-phase PMSM for electromechanical actuator [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2023，9(3)：4059-4070.

[18] 张业成，刘国海，陈前. 基于电流波动特征的永磁同步电机匝间短路与局部退磁故障分类诊断研究[J]. 电工技术学报，2022，37(7)：1634-1643.
Zhang Y C，Liu G H，Chen Q. Discrimination of interturn short-circuit and local demagnetization in permanent magnet synchronous motor based on current fluctuation characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37(7)：1634-1643.

[19] 马建，王建平，孟德安，等. 永磁同步电机故障诊断方法研究综述[J]. 电力工程技术，2024，43(4)：104-115.
Ma J，Wang J P，Meng D A，et al. Review of fault diagnosis methods for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Power Engineering Technology，2024，43(4)：104-115.

[20] 崔广慧. 感应电动机绕组匝间短路与缺相运行时电磁场特性分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2016.
Cui G H. Research on electromagnetic field of winding turn-to-turn short circuit and phase-deficient operation in induction motor [D]. Harbin：Harbin

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

University of Science and Technology, 2016.

[21] 付彦伟, 余建生, 易建波. 永磁同步电机匝间短路故障匝数诊断方法[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(9): 42-48.
Fu Y W, Yu J S, Yi J B. Diagnosis method of turns of permanent magnet synchronous motor for inter-turn short-circuit fault [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(9): 42-48.

[22] Tian X L, Guo H, Xu J Q. Inter-turn short-circuit fault diagnosis of six-phase FTPMSM system based on PWM harmonic current extraction [C]//2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems, Chiang Mai, Thailand, 2022: 1-5.

[23] 张德金, 邱小华, 尹华杰, 等. 永磁同步电机耐退磁优化设计研究[J]. 家电科技, 2023(3): 68-72.
Zhang D J, Qiu X H, Yin H J, et al. Research on demagnetization optimization design of permanent magnet motor [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2023(3): 68-72.

[24] 刘曜. 永磁同步电机永磁体退磁机理与抗局部退磁优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
Liu Y. Research on demagnetization mechanism of permanent magnet and anti-local demagnetization optimization on the permanent magnet synchronous machine [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2023.

[25] 肖勇, 陈彬, 李霞, 等. 永磁辅助同步磁阻电机退磁仿真分析[J]. 微特电机, 2021, 49(7): 9-13.
Xiao Y, Chen B, Li X, et al. Simulation analysis of demagnetization for permanent magnet assisted synchronous reluctance motors [J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(7): 9-13.

[26] Mörée G, Sjölund J, Leijon M. A review of permanent magnet models used for designing electrical machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(11): 1-19.

[27] 刘保泉, 张洪信, 魏士文. 考虑损耗的表贴式永磁同步电机极弧系数优化[J]. 微特电机, 2022, 50(4): 15-19+24.
Liu B Q, Zhang H X, Wei S W. Optimization of the pole-arc coefficient of surface-mounted permanent magnet synchronous motors considering losses [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(4): 15-19+24.

[28] 骆凯传, 师蔚, 张舟云. 基于温度实验的永磁同步电机损耗分离方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4060-4073.
Luo K C, Shi W, Zhang Z Y. Method of loss separation of permanent magnet synchronous motor based on temperature experiment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4060-4073.

[29] 刘文秀. 永磁同步电机损耗计算及温度场分析综述[J]. 机电工程技术, 2026, 55(11): 19-25.
Liu W X. Overview of loss calculation and temperature field analysis of permanent magnet synchronous motor [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2026, 55(11): 19-25.

[30] 徐海峰, 赵龙章, 唐朝, 等. 永磁同步电机电流速度响应优化控制研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(3): 176-179.
Xu H F, Zhao L Z, Tang C, et al. Research on permanent magnet synchronous motor current and speed response optimizing control [J]. Computer Simulation, 2018, 35(3): 176-179.

[31] 龚佳乐, 李明, 郑继鑫. 过载对屏蔽式永磁同步电机性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 412-421.
Gong J L, Li M, Zheng J X. Effect of overload on performance of canned permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(4): 412-421.

收稿日期:2026-03-30
收到修改稿日期:2026-07-12

作者简介:

王天阳(2000—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机设计及多物理场研究,a2480937162@163.com;

*通信作者:李 明(1987—),男,博士,副教授,研究方向为特种电机设计及控制技术,liming1@qymail.bhu.edu.cn。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.