



移动阅读

上官璇峰,胡刚强,王双平,等. 铁氧体助磁的五相同步磁阻电机一相开路研究[J]. 煤炭学报,2020,45(S1): 514-521. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1238

SHANGGUAN Xuanfeng, HU Gangqiang, WANG Shuangping, et al. Research of five-phase ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance motor under single-phase open fault[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 514-521. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1238

铁氧体助磁的五相同步磁阻电机一相开路研究

上官璇峰,胡刚强,王双平,马亚涛,李飞翔

(河南理工大学 电气工程与自动化学院,河南 焦作 454000)

摘要:当传统三相永磁同步电机发生一相开路故障后电机的转矩输出能力下降,转矩波动大,五相永磁同步电机具有输出转矩波动小和容错能力强的突出优点,在电动汽车、军事和伺服电机场合中应用十分广泛。由于五相电机成本随着相数的增加而增加和铁氧体具有的价格优势,五相电机转子中采用铁氧体助磁结构。为了研究铁氧体助磁的五相同步磁阻电机发生一相开路故障后电机的容错性能,采用了故障前后总磁动势不变原则的容错控制策略,合理调整剩余四相电流幅值和相位来探讨电机一相开路后的电机性能。建立铁氧体助磁的五相同步磁阻电机(PMa-SynRM)有限元分析(FEA)模型,对五相电机正常、一相开路故障和采用容错控制(FTC)策略后3种状态的转矩波动、效率、转子受到不平衡径向磁拉力、铁氧体的退磁和电机温升情况进行了分析对比。结果表明:在一相开路故障状态下,电机的转矩脉动和转子受到不平衡径向磁拉力变大。采用容错控制后,电机转矩波动、转子受到不平衡径向磁拉力和铁氧体的退磁风险得到改善,但由于铜耗的增加造成电机的效率降低,整体温度升高,一相开路故障和采用容错控制后的绕组温度均呈现不均匀分布。在五相电机一相开路的研究基础之上,为五相及更多相的电机的探究提供依据。

关键词:铁氧体助磁的五相同步磁阻电机;一相开路;性能对比;容错控制

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2020)S1-0514-08

Research of five-phase ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance motor under single-phase open fault

SHANGGUAN Xuanfeng, HU Gangqiang, WANG Shuangping, MA Yatao, LI Feixiang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: When the single-phase open fault of the traditional three-phase permanent magnet synchronous motor happens, the output torque's ability of the motor is greatly reduced and the torque ripple is large. The five-phase permanent magnet synchronous motor has the outstanding advantages of small torque ripple and strong fault tolerance. It is widely used in electric vehicle, military and servo motor occasions. Because the cost of the five-phase motor increases with the increase of the number of phases and the price advantage of ferrite, the ferrite magnetic aid structure is used in the rotor of the five-phase motor. In order to study the fault-tolerant performance of the five-phase ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance motor after single-phase open fault, a fault-tolerant control strategy was adopted based on the principle of invariant magneto-motive force after single-phase open fault. And the performance of the motor after single-phase open fault was discussed by adjusting the amplitude and phase of the remaining four-phase current reasonably. A finite element analysis (FEA) model of five-phase ferrite permanent magnet assisted synchro-

收稿日期:2019-09-05 修回日期:2019-11-12 责任编辑:郭晓炜

作者简介:上官璇峰(1965—),男,河南浚池人,教授,博士。E-mail:sgxf@hpu.edu.cn

通讯作者:胡刚强(1992—),男,河南中牟人,硕士研究生。E-mail:734283339@qq.com

nous reluctance motor (P_{Ma}-SynRM) was established. The torque ripple, efficiency, unbalanced radial magnetic pull of rotor, the demagnetization of ferrite and the temperature rise of the five-phase motor in the conditions of health, single-phase open fault and fault-tolerant control (FTC) strategy were analyzed and compared. The results show that the torque ripple of the motor and the unbalanced radial magnetic pull of the rotor increase under the condition of single-phase open fault. After adopting fault-tolerant control, the torque fluctuation of motor, the unbalanced radial magnetic pull of rotor and the demagnetization risk of ferrite are improved, but the efficiency of motor is reduced and the overall temperature is increased due to the increase of copper consumption. The temperature distribution of windings under single-phase open fault and fault-tolerant control conditions is uneven. Based on the research of five-phase motor under single-phase open fault conditions, it provides the basis for future research on five-phase and more phases' motor.

Key words: five-phase ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance motor; single-phase open fault; performance comparison; fault tolerant control

与传统稀土永磁材料相比,铁氧体具有资源丰富、制造工艺简单、成本低和性能稳定等优点,应用十分广泛。目前,铁氧体助磁的五相同步磁阻电机可以在不使用昂贵稀土永磁的情况下达到很高的性能指标。

与传统的三相电机系统相比,多相容错电机系统具有更高的自由度^[1-4],容错运行能力强。所以,在对运行可靠性要求较高的应用场合,多相电机成为优先选择。随着相数的增加,多相电机表现出更好的容错能力、更高的转矩电流密度、更低的高频脉动转矩幅值^[5-9]、更高的运行可靠性和更高的工作效率。当然,随着定子绕组相数的增加,电机本体和控制系统的复杂程度也将提高,系统的成本也将增加,控制非常复杂^[10],因此电机的相数也不宜过多。综合考虑,五相电机是比较合理的选择。

铁氧体助磁的五相同步磁阻电机综合了铁氧体永磁电机和五相电机的优点,是一种具备良好性能和广阔应用前景的电机。

容错控制的根本目标是使电机在故障状态下仍具备较高的带载能力和较好的运行性能。当五相电机的某一相、两相发生开路或者短路故障时,电机虽仍具有一定的转矩输出能力,但输出转矩大幅下降,转矩波动显著增大^[11],电机将产生更大不平衡的磁拉力,进而导致更大的运行噪音^[12]。赵品志等^[13]以一相开路故障下的正交数学模型,分别推导了基波和3次谐波电流单独作用下的转矩方程,提出了通过注入3次谐波电流抑制3次谐波磁场引起的2次、4次转矩脉动的解析方法。陈敏祥等^[14-15]详细推导验证了基于总磁动势不变原则的五相永磁同步电机一相开路容错策略,调整剩余相电流的幅值和相位来改善电机性能;高宏伟等^[16-17]建立五相电机一相开路后的解耦变换矩阵的数学模型,根据定子铜耗最小和定

子铜耗相等的原则,得到基于解耦模型的容错电流控制策略,减小电机转矩波动。

笔者基于故障前后总磁动势不变的原则,对铁氧体助磁的五相 P_{Ma}-SynRM 一相开路故障进行分析。首先,分析五相 P_{Ma}-SynRM 的工作原理和容错控制策略,合理调整一相开路故障后剩余四相电流的幅值和相位。针对五相 P_{Ma}-SynRM 正常状态、一相开路和采用容错控制策略后的转矩脉动、效率进行对比分析;然后分析3种状态下铁氧体退磁情况,最后对比分析了五相电机3种状态下转子受到径向不平衡磁拉力和电机温升情况。

1 五相电机的结构原理和容错控制

本文研究的电机为1台五相、四极、3 kW 的铁氧体助磁的同步磁阻电机,其主要参数见表1。通入对称五相正弦电流,产生圆形的旋转磁场。五相电机正常工作电流相量如图1所示。工作电路简图如图2所示。正常运行时通入定子五相绕组的电流为

$$i_{\lambda} = I_m \sin\left(\omega t + (n - 1) \frac{2\pi}{5}\right) \quad (1)$$

式中, λ 为 A, B, C, D, E 相,对应 n 为 1, 2, 3, 4, 5。

表 1 电机主要参数

Table 1 Main parameters of motor

参数	值
定子外径 D/mm	190
额定功率 P/kW	3
线圈匝数	26
气隙 g/mm	0.8
额定转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 500
极/槽	4/15

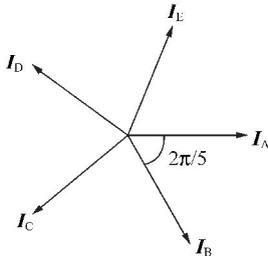


图 1 五相电机正常运行时电流相量

Fig. 1 Current vector diagram of the five-phase motor

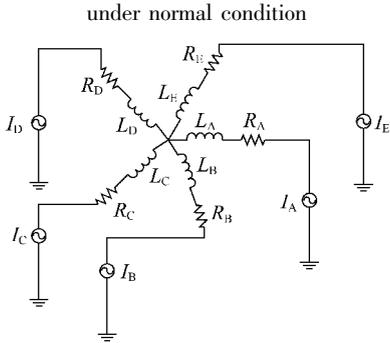


图 2 五相电机正常工作电路

Fig. 2 Working circuit sketch of the five-phase motor

under normal condition

当五相电机 A 相绕组发生开路故障时,若不采取任何控制措施,电机将产生椭圆形旋转磁场,转矩脉动变大,电机噪声也随之增大,严重影响电机性能。因此,根据发生故障前后总磁动势不变的原则,调整缺相后电机剩余四相电流的幅值和相位,以提升电机产生电磁转矩的能力,并减小转矩波动。

根据叠加原理,电机的总磁动势为每一相绕组产生的磁动势之和。A 相开路以后,调整剩余四相电流的约束条件^[15]为

$$\begin{cases} I'_B = -I'_D \\ I'_C = -I'_E \end{cases} \quad (2)$$

当 A 相绕组发生开路后,为使总磁动势不变,合理调整剩余四相电流的相位和幅值,调整后电流幅值为原来电流幅值的 1.382 倍^[14],其剩余四相电流相量如图 3 所示。

$$\begin{cases} I_B = 1.382I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{5}\right) \\ I_C = 1.382I_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{5}\right) \\ I_D = 1.382I_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{5}\right) \\ I_E = 1.382I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{5}\right) \end{cases} \quad (3)$$

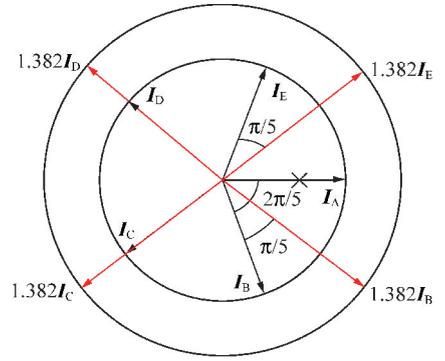


图 3 电机采用容错控制后的电流相量

Fig. 3 Current vector diagram of motor after FTC

2 容错分析

2.1 转矩、效率特性分析

当五相电机发生 A 相开路故障后,将导致剩余四相电流不对称,产生椭圆形磁场。下面对五相电机正常、A 相开路和采用容错控制策略后状态进行了转矩波动和效率的分析对比,3 种状态下转矩角特性如图 4 所示。

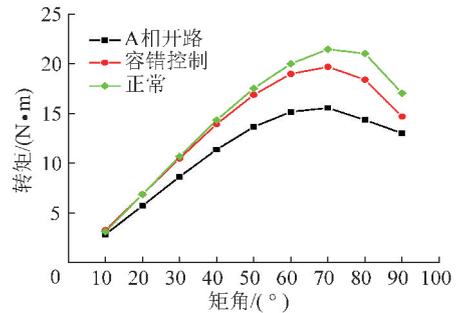


图 4 电机正常、故障、容错控制后状态转矩角特性曲线

Fig. 4 Torque angle characteristic curves of motor under of normal, fault, and FTC conditions

对比 3 种状态:在五相电机发生 A 相开路故障后,电机的转矩输出能力明显下降,与正常状态下的输出转矩相差较大;当电机采用容错控制策略后,电机的输出转矩能力得到明显改善,满足电机输出转矩要求继续运行。

在相同负载下对比五相电机 A 相开路前后的电机性能,调整电机功角,选取相同负载为 15.6 N·m,在电机正常、采用容错控制策略后和 A 相开路故障 3 种状态下电机的功角不同,分别为 45°,46°和 69°。输出转矩如图 5 所示。

五相电机正常工作状态下输出转矩波动为 7.02%。在 t_1 时刻电机发生 A 相开路故障,发生 A 相开路故障后的转矩波动为 81.22%,电机输出转矩波动较大,系统几乎不能正常工作。在 t_2 时刻电机得到容错控制策略后转矩波动降低至 35.63%,电机

转矩波动下降 50% 以上,取得了良好的容错效果,电机得以继续工作。

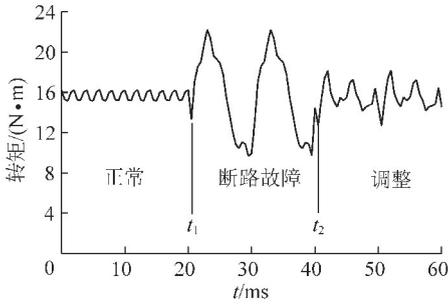


图 5 电机正常、故障、容错控制后转矩波动曲线
Fig. 5 Torque fluctuation curve of motor under of normal, fault, and FTC conditions

不同功角下电机效率曲线如图 6 所示。由于采用容错控制后的电流幅值是正常状态下的 1.382 倍且电机铜耗与电流的平方成正比,对效率的影响较大,其效率表示为

$$\eta = \left(1 - \frac{kI^2R + \sum p}{P_2 + \sum p} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中, P_2 为输出功率; $k=4,5$; $\sum p$ 为除电枢绕组铜耗以外的其他损耗。

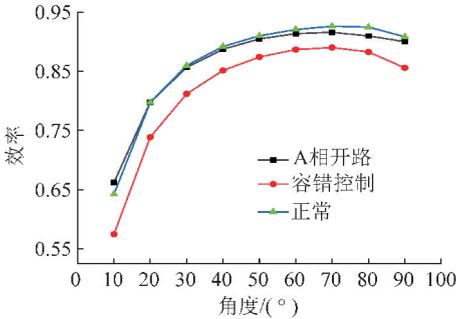


图 6 电机正常、故障、容错控制后状态效率曲线
Fig. 6 Efficiency curves of motor under of normal, fault, and FTC conditions

在电机相同负载(15.6 N·m)条件下,正常工作状态下效率为 90.2%,发生 A 相开路故障后效率为 91.34%,在电机采用容错控制后效率为 86.65%,较正常和故障状态下效率降低。3 种状态下转矩波动和效率对比见表 2。

表 2 3 种状态下转矩波动、效率对比

Table 2 Comparison of torque fluctuation and efficiency under three conditions

状态	0~ t_1	t_1 ~ t_2	t_2 ~ ∞
转矩波动/%	7.02	81.22	35.63
效率/%	90.20	91.34	86.65

2.2 永磁体退磁分析

当定子电枢磁场和铁氧体充磁方向相同时,铁氧体处于助磁状态;相反,当定子电枢磁场和铁氧体充磁方向相反时,铁氧体处于去磁状态,严重时可能会发生不可逆退磁,即铁氧体的退磁机理。

铁氧体剩磁通密度不高,周围环境温度对铁氧体的磁性能有很大的影响。低温时,退磁曲线在第二象限出现拐点。当磁通密度小于 $B-H$ 曲线拐点磁通密度时,或反向磁场在 $B-H$ 曲线上迫使铁氧体的磁通密度下降到拐点以下,就会发生不可逆退磁。图 7 为所采用铁氧体在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的 $B-H$ 曲线,发生不可逆退磁的拐点磁密为 0.125 T,当铁氧体的磁密低于拐点处磁密时发生不可逆退磁。所以铁氧体在使用时要进行低温环境时最大去磁工作点的校验计算,以防止在低温时产生不可逆退磁。此外,在转子中设计如非平行磁通势垒、锥形气隙和凹口合并等几何形状^[18],通过改变主磁路磁阻可以提高铁氧体抗退磁能力,在文献[19-20]中解释了基于锥形磁通势垒的 PMA-SynRM 退磁磁场电路的分析模型。

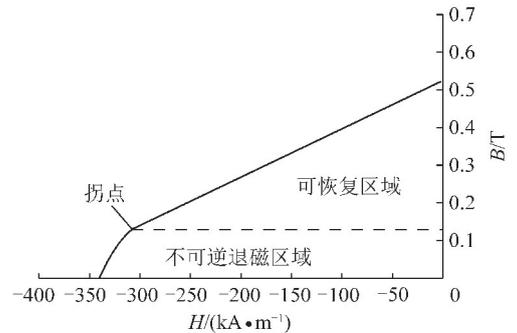


图 7 铁氧体在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下的 $B-H$ 曲线

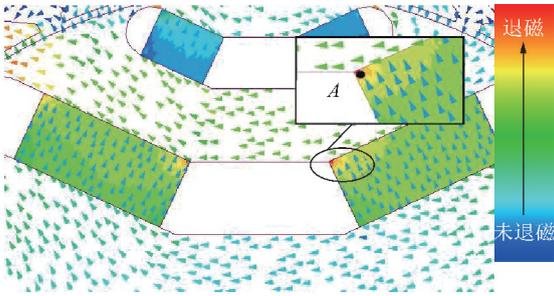
Fig. 7 $B-H$ curve of ferrite at $-40\text{ }^\circ\text{C}$ temperature

本文选择环境温度在 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 下,分别对铁氧体助磁的五相同步磁阻电机正常工作、A 相开路故障、采用容错控制策略后的 3 种状态的铁氧体的退磁情况进行了校验和对比分析。

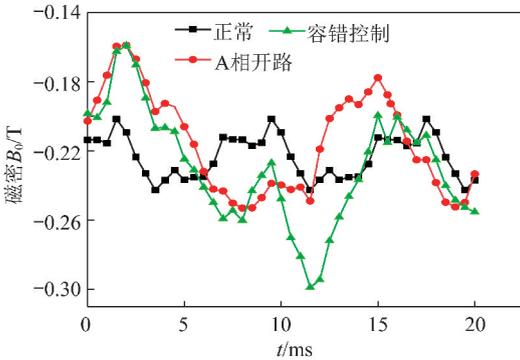
用 B_0 表示铁氧体的退磁程度, B_1 表示铁氧体在环境温度 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 下拐点的磁密, B 表示该点真实磁密。即:

$$B_0 = B_1 - B \quad (5)$$

当 B_0 值为负值时,则铁氧体真实磁密在拐点以上,铁氧体不发生不可逆退磁;当 B_0 值为正值时,则铁氧体真实磁密在拐点以下,铁氧体发生不可逆退磁。由于电机转子的对称性,转子 4 个极中选择 1 个极作为分析对象,其中 1 个极的 B_0 和磁场方向分布云图如图 8 所示。而在每 1 极的 4 块铁氧体中, A 点 B_0 值较大,铁氧体存在退磁风险的可能性较大。因此选择 A 点作为 3 种状态下低温退磁分析对比的参考点。

图8 B_0 磁通密度和方向分布Fig. 8 Flux density and directional distribution of B_0

在相同负载、低温 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 下,正常、A相开路和采用容错控制后A点 B_0 值如图9所示。从3种状态曲线可以看出,正常工作情况下 B_0 值较稳定,A相开路和再用容错控制后 B_0 值波动较大。但是在A相开路状态下,A点 B_0 值均比正常和采用容错控制后的大,具有较大的退磁风险。但是采用容错控制后,铁氧体的退磁裕度升高,退磁风险降低。

图9 电机正常、故障、容错控制后参考点A的 B_0 值Fig. 9 B_0 value at reference point A of motor under of normal, fault, and FTC conditions

2.3 不平衡磁拉力分析

当电机内磁场分布不对称时,沿径向的合成电磁力不为零,从而产生不平衡的磁拉力。不平衡磁拉力是产生电机振动和噪声的重要因素,使电机轴承加速磨损,降低电机的整体使用寿命,尤其对于高速电机来说更是一种考验。对于 m 相分数槽电机来说,单元电机数 t 等于电机槽数 Z 与电机极对数 p 的最大公约数,原电机由 t 个单元电机组成^[21]。

根据麦克斯韦应力法,电机径向电磁力密度可表示为

$$f_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0} \quad (6)$$

式中, B_n 为径向磁密; B_t 为切向磁密; μ_0 为空气磁导率。

本文采用的15槽4极电机,其定子绕组结构如图10所示。由单元电机定义知道,该电机模型为单元电机结构。虽然五相电机通入相差 72° 的对称五

相电流,但是每相绕组的分布相对于电机直径是不对称的,这样的不对称绕组有助于消除齿槽转矩^[22-23],减小转矩脉动,但不利于产生平衡的磁拉力,将导致电机产生更大的噪声和振动。

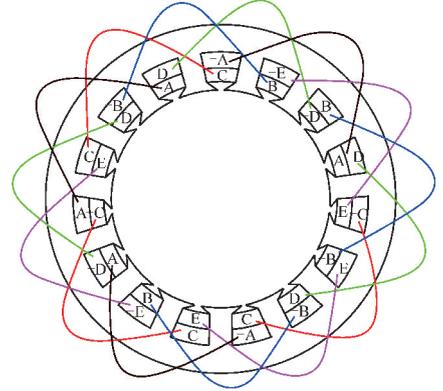


图10 五相电机定子绕组分布

Fig. 10 Distribution of stator windings in five-phase motor

在相同负载($13.7\text{ N}\cdot\text{m}$)下,电机正常工作、A相开路、采用容错控制后,转子在不同位置时所受径向不平衡磁拉力如图11所示。

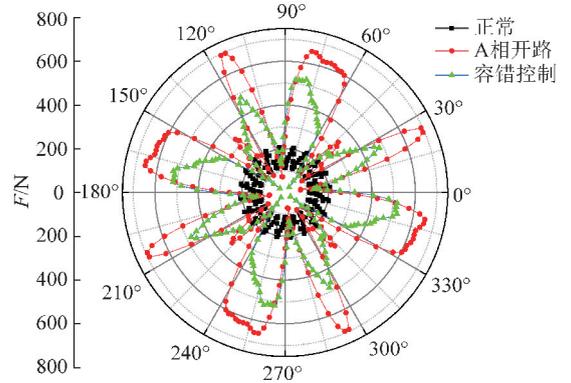


图11 电机正常、故障、容错控制后径向磁拉力

Fig. 11 Radial magnetic pull of motor under of normal, fault, and FTC conditions

正常工作状态,转子受到定子最大径向磁拉力为 208.21 N ,A相开路后转子受到最大径向磁拉力升高至 693.42 N ,比正常状态下高出 233.04% ,采用容错控制策略调整后转子受到最大径向磁拉力下降至 525.24 N ,较故障状态下转子受到的最大径向磁拉力降低 24.25% 。

2.4 三维温度场计算和分析

下面是基于A相开路前后总磁动势不变的原则,对电机正常状态、A相开路故障和采用容错控制后的三维温度场分析。电枢绕组、定子、转子是铁氧体辅助的五相同步磁阻电机的主要产生热源,对以上的主要生热源的生热率进行准确计算。

(1) 绕组铜耗。

$$P_{cu} = 5I^2R \quad (7)$$

式中, I 为绕组相电流的有效值; R 为绕组相的电阻值。

(2) 铁芯损耗。

$$P = P_h + P_e + P_c = C_h f B_m^2 + C_e f^2 B_m^2 + C_c f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (8)$$

式中, P_h 为磁滞损耗, W ; P_e 为涡流损耗, W ; P_c 为附加损耗, W ; f 为频率, Hz ; B_m 为磁密幅值, T ; C_h 为磁滞损耗系数; C_e 为涡流损耗系数; C_c 为附加损耗系数。

(3) 生热率。电机在单位时间、单位体积所产生的热量即为生热率, 计算公式为:

$$Q = \frac{P_n}{V_n} \quad (9)$$

式中, P_n 为电机各部分损耗, W ; V_n 为电机各部分等效体积, m^3 。

对该铁氧体助磁的五相同步磁阻电机正常、A 相开路和采用容错控制后 3 种状态下生热率计算结果见表 3, 在定子、转子和电枢绕组中, 电枢绕组为电机生热最快的部位。

表 3 不同状态下热源生热率

热源位置	正常	开路	容错控制后
定子	63 890	52 184	62 916
转子	8 902	13 524	12 304
电枢绕组	922 860	923 140	1 763 128

气隙是电机机电能量转换的场所, 同时也是定转

子热能相互传递的介质, 准确计算气隙的等效导热系数很重要。转子和定子之间的距离是很小的, 但是, 气隙中的空气不是静止的, 它随着转子的转动而不规则流动。为简化计算, 忽略重力对空气流动的影响, 将流动的空气等效成静止的空气来简化计算。

气隙等效导热系数根据式(10)计算:

$$\begin{cases} \lambda = 0.0019\eta^{-2.9084}R^{0.4614\ln(3.33361\eta)}e \\ Re = \frac{\omega\delta_g}{\nu} \\ \eta = \frac{R_i}{r_o} \end{cases} \quad (10)$$

式中, Re 为空气的雷诺数; δ_g 为气隙长度, m ; ν 为空气运动黏度, m^2/s ; R_i 为定子内径, mm ; r_o 为转子外径, mm 。

铁氧体助磁的五相同步磁阻电机正常、A 相开路和采用容错控制后 3 种状态下电机的整体温度和绕组温度分布分别如图 12、13 所示(单位: $^{\circ}C$)。图 13(a) 表示正常工作状态下电机绕组的温度分布, 从结果可以看出, 电机正常工作状态下电机绕组温度分布在 $65.55 \sim 68.38^{\circ}C$, 3 种状态表现出下层绕组温度比外层高。图 13(b) 和图 13(c) 分别表示 A 相开路故障和容错控制后电机绕组温度分布, 由于绕组 A 相开路的原因, 故障和容错控制后温度分布呈现不均匀的特点, 并且采用容错控制后的电机温度最高。

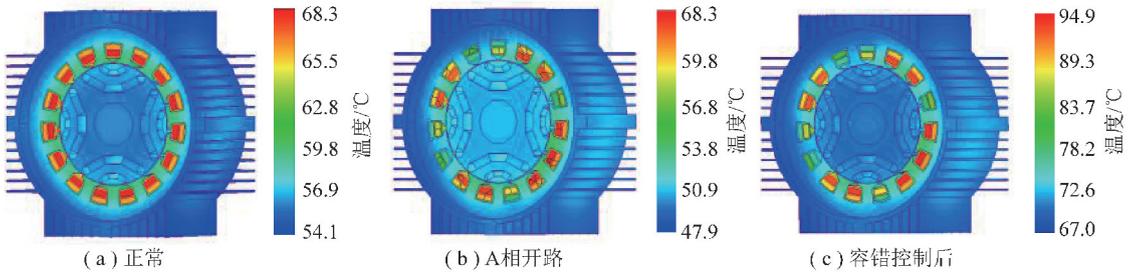


图 12 3 种状态下电机整体温度分布

Fig. 12 The overall temperature distribution of the motor under three conditions

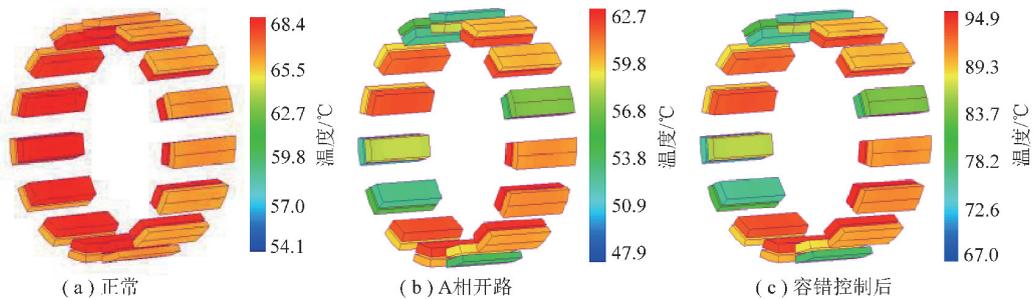


图 13 3 种状态下电机等效绕组温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of equivalent windings of motor under three conditions

3 结 论

(1)在发生 A 相开路故障后,电机的转矩输出性能大幅下降,转矩波动大,电机的效率上也有所降低;在采用容错控制后,电机输出性能得到改善,转矩波动减小;电机效率比故障后仍有所降低。

(2)在电机转子中铁氧体的退磁方面,发生 A 相开路故障后,电机的退磁裕度缩小,有利于铁氧体发生不可逆退磁;在采用容错控制后,退磁裕度得到改善,在相同环境下,一相开路故障状态下铁氧体较正常状态和补偿状态下优先退磁。

(3)在发生 A 相开路故障后,转子所受径向不平衡磁拉力峰值较正常状态升高,采用容错控制后,转子所受径向不平衡磁拉力峰值较一相开路故障状态下降低,有利于减小电机振动和噪音。

(4)在正常工作状态下,电机整体温度分布比较均匀,由于发生 A 相开路故障后和容错控制后定子绕组在空间位置上不对称,电机温度呈现不均匀分布,容错控制后的温度最高。

参考文献 (References):

- [1] ARAFAT A K M, CHOI Seungdeog. Optimal phase advance under fault-tolerant control of a five-Phase permanent magnet assisted synchronous reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 2915-2924.
- [2] MECROW B C, JACK A G, HAYLOCK J A, et al. Fault tolerant permanent magnet machine drives [J]. IEEE Proceedings Electric Power Applications, 1996, 143(6): 437-441.
- [3] JACK A G, MECROW B C, HAYLOCK J A. A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant operation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(4): 889-895.
- [4] HAYLOCK J A, MECROW B C, JACK A G, et al. Operation of a fault tolerant PM drive for an aerospace fuel pump application[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1998, 145(5): 441-448.
- [5] BAEK J, BONTHU S S R, KWAK S, et al. Optimal design of five-phase permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for low output torque ripple [J]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2014, 978(1): 2418-2424.
- [6] BAEK J, BONTHU S S R, CHOI S. Design of five-phase permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for low output torque ripple applications[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(5): 339-346.
- [7] LI Feng, HUA Wei, CHENG Ming, et al. Analysis of fault tolerant control for a nine-phase flux-switching permanent magnet machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 1-4.
- [8] LEILA Parsa, HAMID A Toliyat, ABAS Goodarzi. Five-phase interior permanent-magnet motors with low torque pulsation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(1): 40-46.
- [9] SUMAN Dwari, LEILA Parsa. An optimal control technique for multiphase PM machines under open-circuit faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1988-1995.
- [10] 艾永乐, 王玉梅. 六相感应电机直接转矩控制的新策略[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 952-956.
AI Yongle, WANG Yumei. Novel torque control strategy of six-phase induction machine [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 952-956
- [11] 郑萍, 唐佩伦, 隋义, 等. 电动汽车用五相永磁同步电机的容错控制策略[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(10): 65-69.
ZHENG Ping, TANG Peilun, SUI Yi, et al. Fault-tolerant control strategy of a five-phase permanent magnet synchronous machine used for EV [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(10): 65-69.
- [12] 武玉才, 李永刚, 冯文宗, 等. 汽轮发电机转子绕组短路产生的不平衡磁拉力的研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 37-44.
WU Yucai, LI Yonggang, FENG Wenzong, et al. Analysis on unbalanced magnetic pull generated by turn-to-turn short circuit of rotor windings within turbine generator [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(3): 37-44.
- [13] 赵品志, 杨贵杰, 李勇. 五相永磁同步电动机单相开路故障的容错控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 68-76.
ZHAO Pinzhi, YANG Guijie, LI Yong. Fault-tolerant control strategy for five-phase permanent magnetic synchronous motor under single phase open-circuit fault condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 68-76.
- [14] 陈敏祥, 胡永卫. 五相永磁同步电机一相断路容错策略推导及仿真验证[J]. 机电工程, 2017, 34(7): 768-771.
CHEN Minxiang, HU Yongwei. Open-circuit tolerant strategy and simulation of five-phase permanent magnet motor [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(7): 768-771.
- [15] 上官璇峰, 孟凡胜. 五相永磁同步电动机缺相故障下的磁动势分析[J]. 微特电机, 2012, 40(3): 1-6.
SHANGGUAN Xuanfeng, MENG Fansheng. Analysis of magnetic motive force of five phase PMSM with phase loss [J]. Small & Special Electrical Machines, 2012, 40(3): 1-6.
- [16] 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.

- [17] 朱鹏,张晓锋,乔鸣忠,等. 五相集中整距绕组感应电机缺相容错控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(33):131-137.
ZHU Peng, ZHANG Xiaofeng, QIAO Mingzhong, et al. Tolerant control strategy for five-phase concentrated full-pitch windings induction motor under open phases fault[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(33):131-137.
- [18] ISLAM M Z, CHOI S. Design optimization of rare-earth free pm-assisted synchronous reluctance motor to improve demagnetization prevention capability[J]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC),2017,798(1):1-6.
- [19] VAGATI A, BOAZZO B, GUGLIELMI P, et al. Design of ferrite-assisted synchronous reluctance machines robust toward demagnetization [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3):1768-1779.
- [20] BIANCHI N, MAHMOUD H. An analytical approach to design the PM in PMAREL motors robust toward the demagnetization [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2016,31(2):800-809.
- [21] 陈益广,潘玉玲,贺鑫. 永磁同步电机分数槽集中绕组磁动势[J]. 电工技术学报,2010,25(10):30-36.
CHEN Yiguang, PAN Yuling, HE Xin. Magnetomotive force in permanent magnet synchronous machine with concentrated fractional-slot windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(10):30-36.
- [22] ISLAM R, HUSAIN I, FARDOUN A, et al. Permanent magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2009,45(1):152-160.
- [23] ISLAM M S, MIR S, SEBASTIAN T, et al. Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet machines for low-torque-ripple applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005,41(4):955-962.