

高压直流航空燃油泵电机堵转故障检测与 应急控制技术研究

刘航宇¹, 马瑞卿²

(1. 南京航空航天大学长空学院, 江苏 南京 211106; 2. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

摘要: 针对航空燃油泵用无刷直流电机(BLDCM)发生堵转故障现象,从故障原因、故障检测技术、故障严重程度、故障可控性及故障影响范围出发进行深入研究,旨在提出并验证一种工程上可用的 BLDCM 故障检测方法 with 故障应急控制机制。针对 BLDCM 发生堵转时与堵转后的运行工况,设计了一套基于 BLDCM 转速和母线电流的故障检测与应急控制机制;完成了对 BLDCM 堵转故障检测及应急控制机制仿真。借助已有的燃油泵用 BLDCM 试验台,完成 BLDCM 堵转故障条件下的故障检测与应急控制机制验证。在传统的堵转故障停机保护基础上,针对 BLDCM 运行过程中堵转故障发生的几率和消失的先后,设计了一种降低 PWM 占空比延时重启的堵转故障应急控制机制,提高了堵转故障后系统的生存能力,降低了虚警率。结果具有技术成熟度和工程应用价值。

关键词: 无刷直流电机; 堵转故障; 应急控制; 航空燃油泵

中图分类号: TM33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)11-0055-08

doi: 10.12177/emca.2022.120

Research on High Voltage DC Aircraft Fuel Pump Motor Blockage Fault Detection and Emergency Control Technology

LIU Hangyu¹, MA Ruiqing²

(1. Changkong Colleague, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The brushless direct current motor (BLDCM) for aviation fuel pump has the blockage rotor failure fault phenomena. The fault factors, detecting technologies, and severity, controllability and impact areas are analyzed, and a method of fault detection and emergency control mechanism for BLDCM is designed. Then, for the operating condition of the BLDCM during and after blockage, a method of fault detection and emergency control mechanisms based on the BLDCM speed and bus current is designed and the simulations are completed. With the help of the existed BLDCM test bench for fuel pump, the fault detection and emergency control mechanism verification under the condition of the BLDCM blockage failure are completed. Based on the traditional stoppage protection, an emergency control mechanism of blockage failure which reduces the PWM duty cycle and delayed restart is designed according to the occurrence probability and disappearance sequence of the blockage failure in the BLDCM operation process. The control mechanism improves the survival ability of the system after blockage failure and reduces the false alarm rate. The results have technical maturity and provide engineering application value.

Key words: brushless direct current motor (BLDCM); rotor blockage failure; emergency control; aircraft fuel pump

收稿日期: 2022-09-07; 收到修改稿日期: 2022-09-20

作者简介: 刘航宇(2002—),男,本科在读,研究方向为起动发电及计算机控制技术。

马瑞卿(1963—),男,博士,教授,研究方向为稀土永磁电机伺服控制与电力制动技术。

0 引言

航空燃油泵是航空飞行器的关键部件之一,主要功能是按照飞机需求,将燃油可靠地输送到发动机,以获取飞行器所需的发动机推力,因此燃油泵性能的好坏将直接影响发动机的工作性能和航空飞行器的飞行安全,地位特殊,作用重大。为了减轻涡轮燃油泵系统的能量消耗,提高供油效率,电动航空燃油泵大量地应用在燃油泵系统中^[1-2],如图1所示。



图1 电动燃油泵实物图

稀土永磁无刷直流电机(BLDCM)由于其体积小、质量轻、散热容易、可靠性高等特点,近年来得以在各领域迅速推广应用^[3-8]。通常航空飞行器上用到的燃油泵,均采用了稀土永磁 BLDCM 作为其驱动电机,为燃油泵提供所需的动力。故稀土永磁 BLDCM 在燃油系统中扮演着重要的角色,其可靠性、寿命和控制性能将直接影响到整个航空飞行器的安全^[9]。

通常情况下,虽然 BLDCM 处于密闭环境中,但是在燃油泵工作时,受到自身电机本体设计等内部因素或温度、发动机振动等外部环境的影响,在极端情况下,可能会发生电机堵转故障,若不及时处理,可能会使得电机的转速波动甚至停转,以至航空燃油泵无法正常工作^[10]。

本文重点研究了燃油泵用 BLDCM 发生堵转故障现象,设计了一套 BLDCM 堵转故障检测与应急控制机制;在 BLDCM 数学模型基础上,建立了燃油泵用 BLDCM 本体的仿真模型。运用实际电机技术指标,验证了仿真模型的正确性。通过开发合适的仿真功能模块,完成了对 BLDCM 堵转故障应急控制机制仿真,验证了 BLDCM 驱动器的稳定性和可靠性。编制了 BLDCM 堵转及故障应急控制软件,注入到已有的泵用 BLDCM 控制器中,借助燃油泵用 BLDCM 试验台,完成了

BLDCM 堵转故障条件下的故障检测与应急控制机制验证。

1 航空燃油泵的基本结构及工作原理

航空燃油泵是飞机燃油系统的重要组成部分,其主要功能是为发动机输送燃油以提供动力,燃油泵的性能对飞机的动力性及机动性具有直接影响。随着航空技术的不断进步,燃油泵也在逐渐向高转速、高可靠性和大功率等方向发展^[11-12]。BLDCM 驱动燃油泵的工作原理如图2所示。

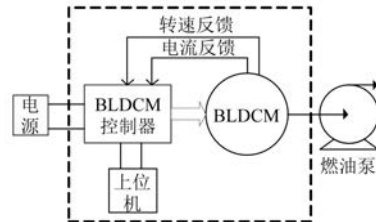


图2 航空燃油泵工作结构示意图

电动燃油泵内置于燃油箱内,一般浸入燃油中使用。电动燃油泵主要由一个驱动电机直联一个离心涡轮泵构成,泵体部分主要由叶轮、外壳和泵盖组成。

燃油泵工作时,电机驱动涡轮泵叶片旋转,叶轮带动燃油旋转。在离心力的作用下,叶片通过纵向旋涡和径向旋涡将能量传递给燃油,使燃油产生压力,进而将燃油从进油器吸入,流经电动燃油泵的蜗壳内部,再从出油口压出,给发动机提供一定流量和压力的燃油供给。

2 电机堵转故障检测与应急控制技术分析

电机在控制器发出起动指令后开始运行,正常情况下,经过一段时间后反馈转速达到设定转速。在一些特殊情况下,电机发生堵转故障,当电机发生堵转故障时,母线电流急速增大,大电流会对电机本体和驱动器造成不良影响,严重时会造成烧毁控制器。

2.1 电机堵转故障分析

BLDCM 的静态端电压方程式为

$$U = I \cdot 2R_a + 2 \cdot \Delta U + E \quad (1)$$

机械特性表达式为

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{2R_a}{C_e \Phi_\delta} I_a = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{2R_a}{C_e C_T \Phi_\delta^2} T_{em} \quad (2)$$

式中: C_e 为反电动势系数; C_T 为电磁转矩系数; Φ_δ 为空间合成磁场的磁通量; T_{em} 为电磁转矩; U 为电机电源电压; ΔU 为开关管的饱和管压降; R_a 为电机一相绕组电阻。

又令:

$$n_0 = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_\delta} \quad (3)$$

式中: n_0 为电机的额定转速。

则式(2)可以写成:

$$n = n_0 - \frac{2R_a}{C_e C_T \Phi_\delta^2} T_{em} \quad (4)$$

由式(4)可知,在 U 恒定时, n 与 T_{em} 成线性反比关系,其机械特性图如图3所示。

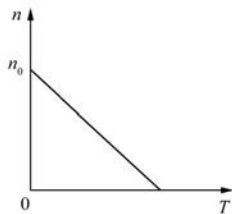


图3 BLDCM的机械特性图

当电机发生堵转故障后,转速 n 变为 0,在 U 不变的条件下,电磁转矩输出最大值。又因为 $T_{em} \propto I$,故当电机发生堵转故障时,电机母线电流会快速变大,从而使得电机定子电枢绕组发热严重,严重时烧毁电机甚至控制器。

2.2 电机堵转检测方法

当电机发生堵转故障时,在任意时刻只有固定的两相绕组在一直导通,电机转速接近 0 或降为 0。此时反电动势极小或为 0,电机导通的两相绕组上承受所有母线电压,因此,此时母线电流会快速增加,迅速达到控制系统设定的电流保护阈值,严重时会产生火灾。故本控制系统选用电机转速和母线电流来综合检测判断电机是否发生堵转故障。

(1) 起动过程中堵转故障判断条件。综合上面的分析和结论,在电机起动过程中,控制系统实时对电机转速进行检测,设置一个固定的采样周期 Δt ,通过测量不同时刻的反馈转速,可算出区

间内其转速变化量 Δn ,然后计算出该采样周期 Δt 内的转速平均变化率:

$$k = \Delta n / \Delta t \quad (5)$$

其中, $k > 0$,表示该采样周期内电机转速上升; $k < 0$,表示该采样周期内电机转速下降。

若控制系统在连续三个采样周期内满足以下条件: $k < 0$ 且 $I_{bus} \geq |I_{bus_max}|$,则判定电机发生堵转故障。

(2) 运行过程中堵转故障判断条件。在电机正常运行过程中,电机反馈转速 n_f 始终稳定运行在给定转速 n_g 左右,母线电流测量值 I_{bus} 也小于母线电流保护阈值 $|I_{bus_max}|$,此时增加转速变化量 Δn 来判断电机是否发生堵转故障:

$$\begin{cases} \Delta n = n_g - n_f > 1\ 000 \\ k < 0 \\ I_{bus} \geq |I_{bus_max}| \end{cases} \quad (6)$$

若控制系统在连续三个采样周期内满足式(5)条件,则判定电机发生堵转故障。

2.3 电机堵转故障的应急控制

通常情况下,航空飞行器的燃油泵系统处于密闭环境中,当燃油泵采用单余度(或单通道)BLDCM系统时,燃油泵滤网膜破损、燃油中存在细小杂质颗粒、定转子气隙之间存在多余物、电机负载转矩的突然变大、电机主轴被抱死或电机定转子之间扫膛等情况发生后,就有可能使得电机发生过载甚至堵转等严重故障。

在一般应用领域中,当电机发生堵转故障时,电机的堵转故障可以在停机后人为的进行排查予以排除,堵转故障对系统的整体影响基本上是可控制的。

但是在大多数航空、航天飞行器上,限于故障排除的可操作性,无法及时排除或根本就没有进行手动排除故障的可能性(例如发射出去后的飞行器),在堵转故障发生后,伴随着BLDCM系统的停机,与其相关联的燃油泵系统、发动机乃至整个飞行器系统会受到极大的影响,严重时,可能会使得飞行器失去动力坠毁。

因此,在航空飞行器燃油泵用BLDCM发生堵转故障时,为了有效避免或防止上述航空飞行器严重事故的发生,本论文在传统的堵转故障停机保护基础上,采用相应的应急控制机制来控制处理电机发生的堵转故障,目的在于提高电机堵

转故障发生后燃油泵系统恢复或复活的几率。

首先归纳出燃油泵用 BLDCM 在运行过程中发生堵转及堵转后的 3 种可能运行变化情况：

(1) 由于外界油压、温度或其他因素作用的变化,使得电机所带的燃油泵负载突然增大,即过载,但是在经过一段时间后,燃油泵负载又恢复正常状态。

(2) 由于各种原因使电机发生堵转故障,但是在经过一段时间后,故障自动消除。

(3) 由于各种原因使电机发生堵转故障,但是在经过一段时间后,故障继续存在,即此时发生永久性堵转故障。

通过分析归纳以上各种故障情况,结合实际运行情况,本文设计的电机堵转应急控制机制示意图如图 4 所示。

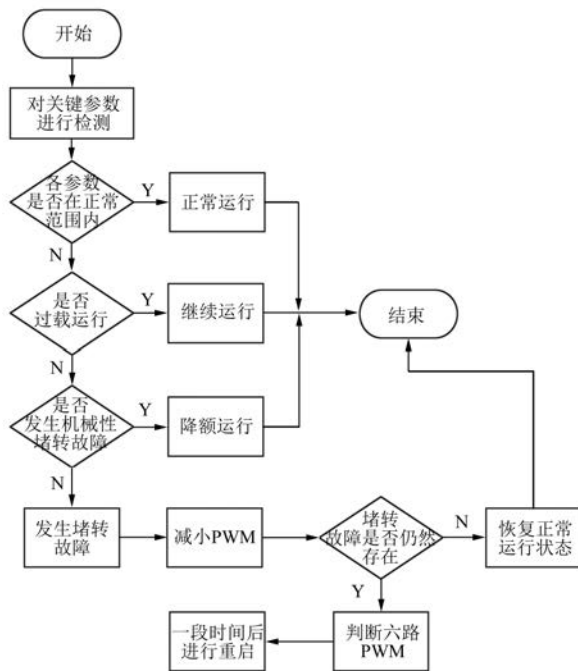


图 4 电机堵转应急控制系统示意图

如图 4 所示,在燃油泵电机正常运行过程中 ($n_g = 11\ 000\ \text{r/min}$),控制系统周期实时的对电机进行监控与关键参数检测,当检测到电机转速、母线电流等关键参量发生变化时,对其进行相应的分析与判断:

(1) 若电机转速,母线电流等参数在正常范围内,则电机继续保持当前运行状态。

(2) 若电机转速 $5\ 000\ \text{r/min} \leq n <$

$11\ 000\ \text{r/min}$,且母线电流大于正常额定值但小于设定阈值,则判断电机发生过载。此时电机继续运转,不做停机处理,并通过降低 PWM 占空比来使电机降额运行。在降额运行期间,若控制系统检测到故障消失,则立即使电机恢复额定状态运行。

(3) 若电机转速 $300\ \text{r/min} \leq n < 5\ 000\ \text{r/min}$,且母线电流大于正常额定值但小于设定阈值,则控制系统判断电机发生机械性堵转故障。此时电机继续运转,通过降低 PWM 占空比来使电机降额运行,在降额运行期间,若故障消失,则立即使电机恢复额定状态运行。

(4) 若电机转速 $n < 300\ \text{r/min}$,且连续三个周期出现 $\Delta n = n_g - n_f > 1\ 000$, $k < 0$ 且 $I_{\text{bus}} \geq |I_{\text{bus_max}}|$,则判定电机发生堵转故障。此时,首先将 PWM 占空比降低一半,使电机继续运行;若控制器在降低 PWM 占空比运行阶段中再次检测到堵转故障,则立刻切断六路 PWM,使电机停机。待 1 s (具体可根据情况而定)后,对电机进行重启。在重启阶段,控制器实时对电机温度进行监测,若电机温度 $T \leq 120\ ^\circ\text{C}$ (具体可根据情况而定),且控制器自检无故障,控制器堵转故障应急控制系统就会持续的进行工作,即持续间断的对电机进行重启;若堵转故障在某一时刻消失,则电机在下一个重启过程后恢复正常运行状态,即燃油泵系统恢复正常工作状态,从而保证了航空飞行器的稳定和安全。

3 电机堵转故障检测与应急控制仿真

3.1 BLDCM 的数学模型

电机电枢电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: u_A, u_B, u_C 分别为电枢绕组相电压; i_A, i_B, i_C 分别为电枢绕组相电流; e_A, e_B, e_C 分别为电枢绕组的相反电动势; R_a, R_b, R_c 分别为电枢绕组相电阻; L 为每相定子绕组自感; M 为每相定子绕组

互感。

由于 BLDCM 的定子绕组为 Y 形连接, 三相定子绕组完全对称, 其三相定子电流之和为 0, 即 $i_A + i_B + i_C = 0$, 且 $M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M_{ba} = M_{cb} = M_{ca}$, $R_a = R_b = R_c$, $L_a = L_b = L_c$, 结合式(7), 代入整理后可得:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (8)$$

BLDCM 的电磁转矩方程为

$$T_e = (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) / \omega \quad (9)$$

3.2 控制系统仿真模型

燃油泵用 BLDCM 控制系统的框图如图 5 所示, 主要包含电机本体模块、转速电流闭环控制模块、三相功率逆变器模块、霍尔信号模块和故障检测等模块。

图6为 BLDCM 控制系统仿真模型, 通过搭

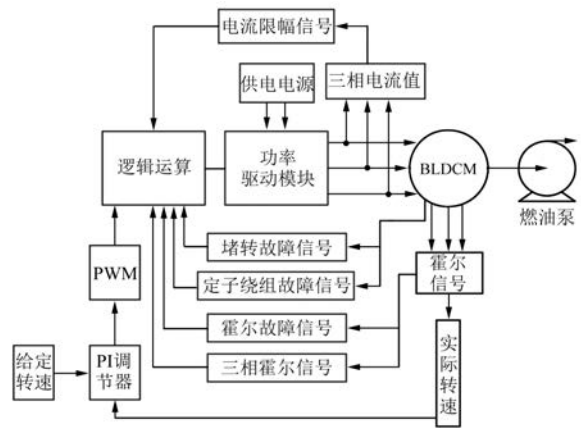


图 5 BLDCM 控制系统框图

建此模型, 可以对燃油泵用 BLDCM 的各种运行及应急控制特性进行分析, 主要包括: 转速和转矩的动态响应及电机各种故障模式的应急控制仿真分析等。电机转速控制由电流内环和转速外环双闭环完成。转速环的输入为转速指令 n^* , 转速环 PI 控制器的输出作为电流环的输入, 依据电流环的输出生成 PWM 波, 进而控制三相逆变器开关管驱动电机, 完成转速和转矩的动态分析。

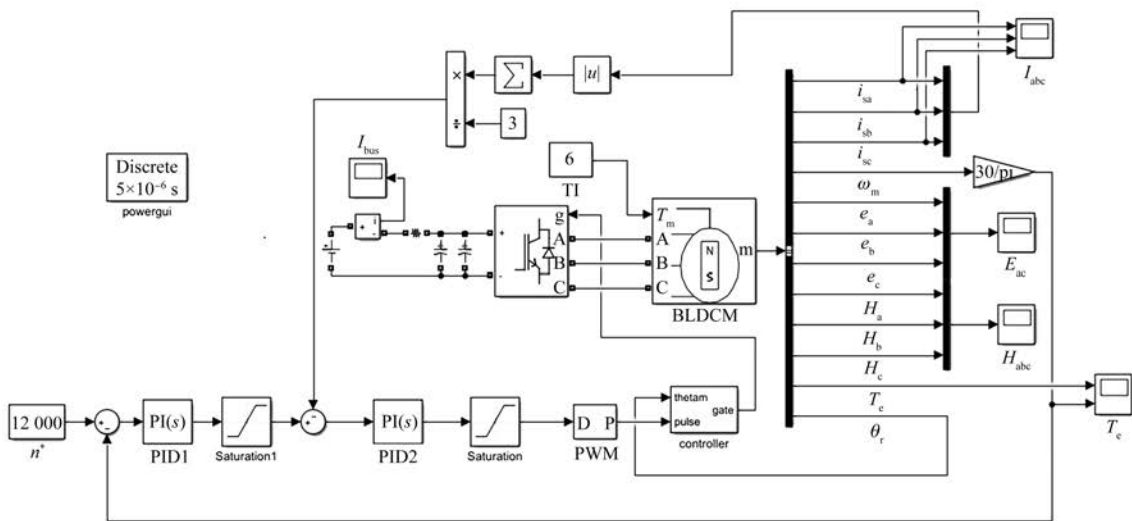


图 6 BLDCM 控制系统仿真模型

3.3 系统仿真参数

本文研究的燃油泵用电机为一台 10 kW、11 000 r/min、2 极的 BLDCM, 该电机所采用的控制方法为定向磁场控制 (FOC)。其控制器输入电压为 28 V, 所用永磁材料为钕铁硼

强磁磁铁 (N35SH)。借助已有的燃油泵用 BLDCM 试验平台, 后续电机堵转故障和堵转应急控制的仿真和试验均基于该电机完成。本文研究的燃油泵用 BLDCM 的具体参数, 如表 1 所示。

表 1 燃油泵用 BLDCM 主要参数

参数名称	参数值
电动势系数 $K_e / (V \cdot r^{-1} \cdot \min)$	0.008 056
额定效率 $\eta / \%$	89
相绕组电感 L_s / mH	0.45
额定转矩 $T_N / (\text{N} \cdot \text{m})$	6.0
额定转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	11 000
相绕组电阻 R_s / Ω	0.342
极对数 p	2
额定电压 U_N / V	270

3.4 电机堵转故障仿真

图 7 为 BLDCM 稳态运行至 0.13 s 时,突然发生堵转时的三相电流、转速和电磁转矩波形。

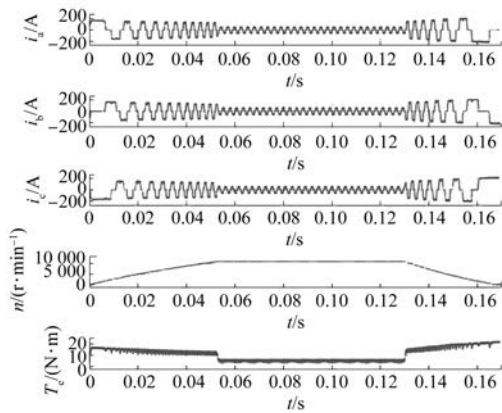


图 7 电机堵转故障仿真波形图

由图 7 可知,电机在 0.05 s 之前为起动阶段,0.05 s 后到达稳定运行状态。在 0.13 s 时,电机发生堵转故障(将负载转矩增大 4 倍,模拟堵转故障),从图 7 中可以看出,当电机发生堵转时,电机三相相电流逐渐增大到电流保护值,并且电流频率降低,电磁转矩急剧增大,电机转速于 0.17 s 左右下降至 0。当电机转速变为 0 时,电机被完全堵转,此时,B 相电流为 0,A 相和 C 相电流为限流幅值 200 A,A 相和 C 相绕组长时间有大电流流过,长时间通过大电流会对控制器产生严重损坏。

3.5 电机堵转应急控制仿真

根据堵转故障消失的时间,本文按以下两种情况研究堵转故障:(1)堵转故障在堵转保护程序进行动作之前消失;(2)堵转故障在堵转保护程序动作之后消失。图 8 和图 9 分别为针对这两

种情况的仿真图。

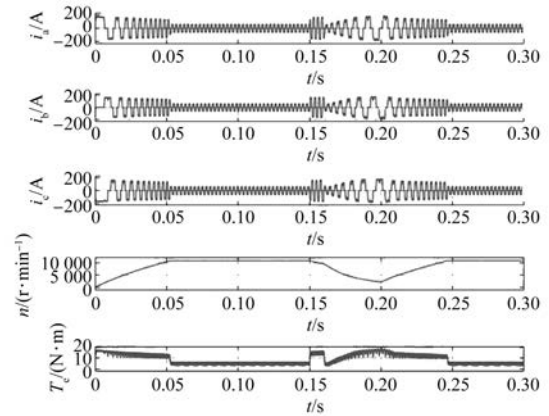


图 8 堵转保护程序未动作仿真波形图

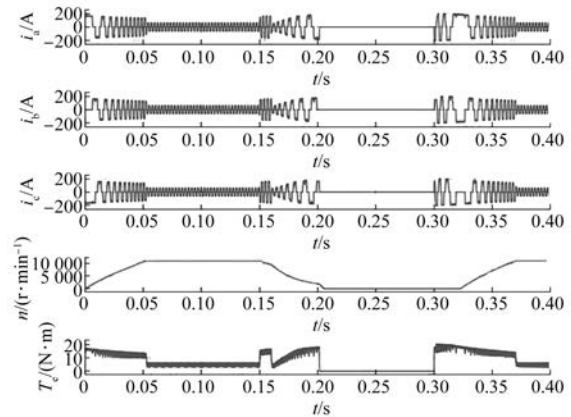


图 9 堵转保护程序动作后仿真波形图

如图 8 所示,0.15 s 时刻前,系统在额定状态下运行。0.15 s 时,系统发生堵转故障,经过综合分析判断,系统在约 0.16 s 时判定发生了堵转故障。此时立刻降低 PWM,由图 8 可知,在降低 PWM 后,电机相电流幅值明显减小,电磁转矩突降,电机转速也快速下降。由于此刻还未达到堵转保护值,故电机系统继续运行,从 0.16~0.2 s,电机相电流幅值逐渐增大,频率减小,转速继续下降,电磁转矩逐渐增大。在 0.2 s,堵转故障消失,电机系统在 0.21 s 检测到堵转故障消失。此时电机立刻进入恢复起启动阶段,并在 0.24 s 恢复额定运行状态。

由图 8 可知,由于有应急控制机制的存在,电机在检测到堵转故障后,并未直接保护停机,而是经过降额运行,使得电机保持了一段时间的低速运转。当堵转故障消失在堵转保护程序动作之前

时,电机立刻恢复正常运行条件,并及时恢复到额定状态,保证了电机运行的连续性。

图 9 为堵转故障在堵转保护程序动作之后消失的仿真示意图,在 0.2 s 之前,动作与图 8 所示相同。在 0.22 s,电机转速几乎降为 0,电流达到设定阈值,此时电机堵转保护程序动作,关断六路功率管,由于逆变器功率管全部关闭,电机三相电流和电磁转矩的值快速降至 0。之后每隔 0.1 s (为便于描述仿真结果,这里将重启间隔时间由 1 s 改为 0.1 s,且忽略电机温度判定条件)电机会尝试一次重启,若堵转故障存在,则重启失败;若堵转故障消失,则开始重启。由图 9 可知,由于堵转故障在 0.28 s 消失,电机在 0.3 s 开始重启,并在 0.35 s 恢复到额定运行状态。

4 电机堵转故障检测与应急控制机制验证试验

4.1 电机堵转故障检测与应急控制程序模块开发

电机堵转故障检测与应急控制程序流程图如图 10 所示。电机在正常稳定运行状态下,控制系统实时对电机各项参数进行检测与监控,若测量

系统判定此时发生了电机堵转故障。应急控制机制立即响应,首先降低 PWM,并实时监控各参量变化情况,若母线电流、转速等参量仍然符合堵转检测条件,则启动堵转保护程序,立即封锁 PWM 信号。之后控制器实时对电机温度进行监测,若电机温度 $T \leq 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,且控制器自检无故障,则电机每隔 1 s (具体可根据情况而定),进行重启。若堵转故障存在,则重启失败;若堵转故障消失,则电机开始重启。

同样,在电机启动时,控制系统实时对电机各项参数进行检测与监控,若测量的转速平均变化率小于 0 且母线电流出现过流,则电机应急控制系统判定此时发生了电机堵转故障。

4.2 电机堵转故障检测与应急控制机制验证过程

在进行电机堵转故障检测与应急控制机制验证试验时,为防止电机堵转故障对驱动系统及电机本体造成不可逆的损坏,仅在空载低转速下进行了一次验证试验。先让 BLDCM 空载运行一段时间,转速为 5 000 r/min,使用特定工具对电机输出轴进行作用,使其发生堵转,为了保护电机及控制器,当观测到控制系统检测到堵转故障时,应

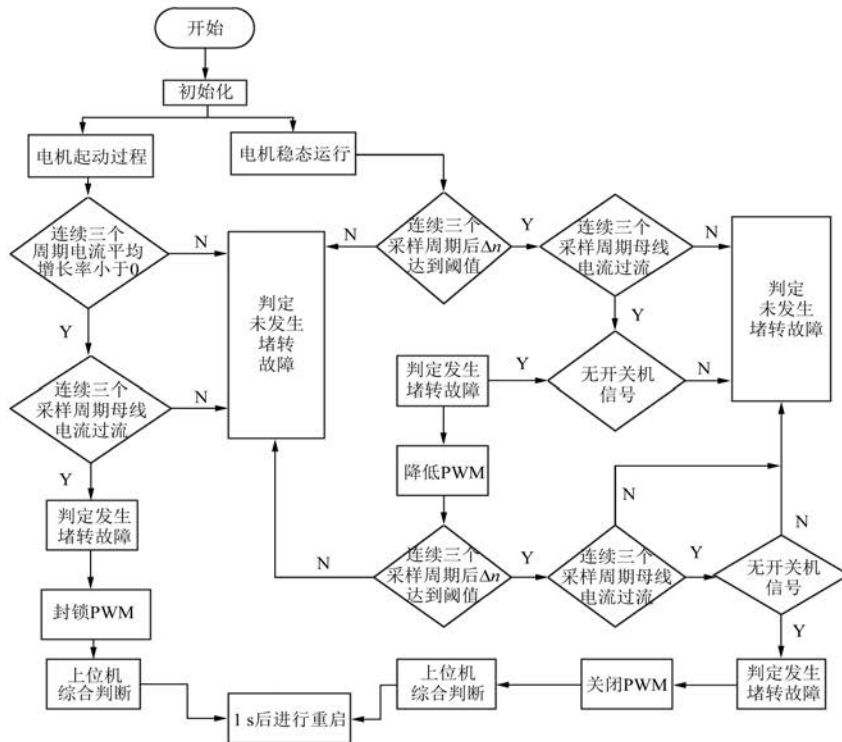


图 10 电机堵转故障检测与应急控制程序框图

立即对电机输出轴解除控制,使其恢复正常运行的条件。

图 11 和图 12 分别是电机发生堵转故障且堵转故障在堵转保护程序动作之后消失的转速和母线电流测量波形图。

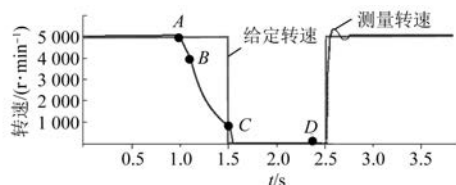


图 11 转速测量波形图

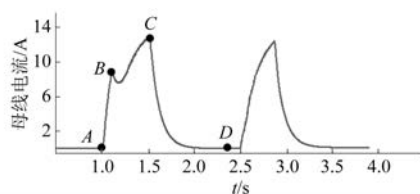


图 12 母线电流波形图

电机运行至 A 点时,对电机轴施加力矩,使其发生堵转故障。从图 11 和图 12 中可以看出,A 点之后电机反馈转速不再继续跟踪给定转速指令,而是快速下降,母线电流急剧增加。经过约 0.1 s 后,即 B 点,电机控制器诊断出该故障,立即通过降 PWM 来减小母线电流。由于堵转故障继续存在,在 1.5 s 时(C 点),控制器进行堵转保护,关断所有功率管,但不断开供电电源。在 D 点,将堵转故障解除,可以看到控制器会在 2.5 s 时进行重启,并于 3 s 左右重启成功。

5 结 语

本文重点分析了电机发生堵转故障机理和关键故障特征,设计了一套基于电机转速和母线电流的堵转故障检测与一种降 PWM 占空比延时重启的堵转故障应急控制机制;完成了建模仿真与试验验证,验证了所设计的堵转检测方法与应急控制机制的合理性和有效性。0.15 s 时,系统发

生堵转故障,经过综合分析判断,系统在约 0.16 s 时判定发生了堵转故障。在 0.2 s,堵转故障消失,电机系统在 0.21 s 检测到堵转故障消失,电机在 0.3 s 开始重启,并在 0.35 s 恢复到额定运行状态。本文的研究具有一定的理论和实践意义。

【参 考 文 献】

- [1] 周治伊, 窦满峰, 刘冬利, 等. 航空燃油泵用无刷直流电机换相时刻研究[J]. 微电机, 2016, 49(7): 9.
- [2] 李鑫. 航空电动燃油泵系统建模与控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [3] 吕孟军, 赵学军, 温海涛, 等. 某型航空发动机燃油泵性能检测台的研制[J]. 自动化仪表, 2014, 35(1): 77.
- [4] FENG S, DING Z. Research on start-up process of no position sensor brushless DC motor [C] // 5th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering (ICMMCCE 2017), 2017.
- [5] FARADJA P, QI G. Local bifurcation analysis of brushless DC motor[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(2): e2710.
- [6] 田雪丰. 基于新型切换开关的高可靠电机控制系统[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
- [7] 叶津津. 基于 DSP 的无刷直流电机调速系统研究与设计[D]. 桂林: 广西师范大学, 2019.
- [8] 文森. 面向电动燃油泵的电机伺服控制系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [9] 王帅, 熊官送, 曹东海. 一种可容错的无刷直流电机驱动控制方法[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(3): 93.
- [10] 刘瑞欣. 基于霍尔位置传感器的车用辅助电机 BLDCM 控制系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [11] 张旭. 基于红外图像的行人跟踪方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [12] 白永明, 陶艺, 吴迎春, 等. 基于改进 NSGA2 算法的航空燃油泵叶轮优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 132.