

考虑电容充放电延迟的永磁起动/发电系统 模式切换策略*

刘剑宇, 董 婷

(沈阳工业大学, 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对永磁起动/发电系统在模式切换过程中出现电压坠落的问题, 本文在传统模式切换策略的基础上, 提出了一种考虑电容充放电延迟的模式切换策略。通过考虑电容充放电延迟过程, 改变控制结构与电气负载开关切换时间, 降低切换过程中的坠落电压。在模式切换控制器中设置发电模式转速阈值, 使其在发动机故障转速无法维持发电模式时平稳切换至起动模式。该切换策略提高了系统的稳定性。通过仿真试验, 验证了上述切换策略的正确性和可行性。

关键词: 永磁起动/发电系统; 模式切换策略; 电容充放电延迟; 发电模式转速阈值

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)07-0059-07

doi: 10.12177/emca.2023.066

Mode Switching Strategy of Permanent Magnet Starting/Generating System Considering Capacitor Charging and Discharging Delay*

LIU Jianyu, DONG Ting

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to solve the problem of voltage drop in the process of mode switching in permanent magnet starting/generating system, a mode switching strategy considering capacitor charging and discharging delay is proposed based on the traditional mode switching strategy. By considering the delay process of capacitor charging and discharging, the control structure and the switching time of electrical load switch are changed to reduce the drop voltage during the switching process. Set the generation mode speed threshold in the mode switching controller, so that it can smoothly switch to the starting mode when the generation mode cannot be maintained. This switching strategy improves the system stability. Through simulation experiment, the correctness and feasibility of the above switching strategy are verified.

Key words: permanent magnet starting/generating system; mode switching strategy; capacitor charging and discharging delay; generation mode speed threshold

0 引言

在油动植保无人机领域, 应用起动/发电系统, 既弥补了传统油动无人机缺少电力源、电力供应不充分等缺陷^[1], 又具有油动无人机本身续航

时间长、带载能力强的优点。由于永磁同步电机具有功率密度大、效率高、控制策略简单等优点, 因此常使用永磁同步电机作为起动/发电系统中的起动/发电机^[2]。由于脉冲宽度调制(PWM)具有功率双向可逆传输, 常使用PWM可控整流电

收稿日期: 2023-02-21; 收到修改稿日期: 2023-03-22

* 基金项目: 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC210213)

作者简介: 刘剑宇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高品质永磁及特种电机系统。

董 婷(1982—), 女, 博士, 教授, 研究方向为交流伺服电机及其控制系统。

路作为启动/发电系统中的功率变换器^[3]。

在永磁启动/发电系统依据系统运行状态由启动状态切换至发电状态时,负载并联电容存在充放电延迟^[4]。因此直流端电压将会出现电压坠落现象,直流端电压在短时间发生向下跳变,产生较大谐波分量,影响直流端负载供电质量和系统稳定性^[5],因此抑制切换过程中的坠落电压是永磁启动/发电系统面临的技术难点之一^[6]。

对于永磁启动/发电控制系统,大多数学者注重于启动状态时的调速问题^[7-8]与发电模式时的稳压问题^[9-11],对模式切换过程及电压坠落研究较少。文献[4]提出一种基于遗传算法寻优的滑模变结构模式切换控制器。文献[12]提出了开关控制策略,但未给出详尽的设计过程。文献[13]对电机制动过程中的电容状态进行了分析,为本文所提出的切换策略降低坠落电压提供了思路。

同时,在发动机发生故障转速过低,无法提供发电模式电机的功率需求时,永磁启动/发电系统有由发电模式紧急切换至启动模式制动的需求^[14-15],但现有切换策略对此功能的实现研究较少。

基于此,本文对永磁启动/发电系统模式切换进行研究,提出一种考虑电容充放电延迟的永磁启动/发电系统模式切换策略。该策略既可以降低传统切换策略中出现的坠落电压,也可以实现紧急情况下由发电模式向启动模式切换制动。通过仿真试验,验证所提控制策略的正确性与可行性。

1 切换过程电压坠落分析及发电模式转速阈值计算

1.1 启动/发电系统与传统模式切换策略

永磁启动/发电系统拓扑结构如图1所示。其运行在启动模式、发电模式与切换模式三种模式中^[16]。

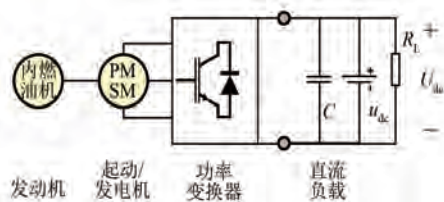


图1 永磁启动/发电系统结构拓扑图

常用的永磁启动/发电系统模式切换框图如图2所示。图2中包括电流内环与转速/电压外环。通过电流内环,系统分别对d轴电流 i_d 与q轴电流 i_q 进行解耦控制。通过转速或电压外环,系统分别在启动模式或发电模式对转速 n 或直流端电压 U_{dc} 进行控制,并向电流内环输入q轴给定的电流 $i_{q*_{-n}}$ (启动模式)或 $i_{q*_{-U_{dc}}}$ (发电模式)。外环切换由模式切换控制器实现。

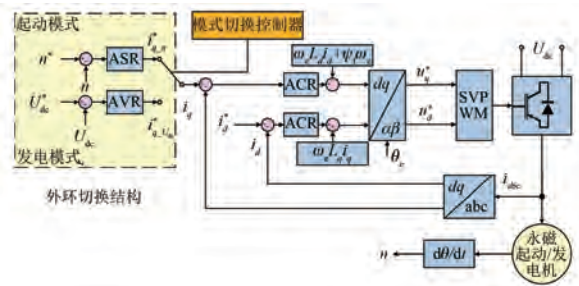


图2 切换策略控制框图

系统在启动模式与发电模式运行状态如表1所示。

表1 启动模式与发电模式比较

项目	启动模式	发电模式
永磁启动/发电机状态	电动机	发电机
控制结构	转速-电流双闭环	电压-电流双闭环
直流负载所并联结构	蓄电池	电容
供电情况	蓄电池向电机与直流负载供电	发动机拖动向直流负载供电
电磁功率流向	负载端→电机	电机→负载端
q轴电流 i_q	$i_q > 0$	$i_q < 0$

在实现模式切换时,也需对电气负载结构进行切换。在传统切换策略中(电气负载结构切换如图3所示),当启动/发电系统处于启动状态时,开关信号 $g_1 = 1$;处于发电模式时,开关信号 $g_1 = 0$ 。开关信号 $g_1 = 0$ 时,开关断开;开关信号 $g_1 = 1$ 时,开关闭合。

1.2 切换过程电压坠落分析

传统切换策略虽然较为简单,但没有考虑在切换过程中由于电容充放电延迟而电压不能发生

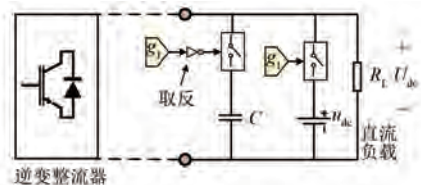


图3 传统切换策略的电气负载结构切换示意图

突变的情况,在切换过程中不可避免地会产生较大的坠落电压。图4即为应用传统切换策略时,系统由起动模式切换至发电模式时出现的电压坠落现象。

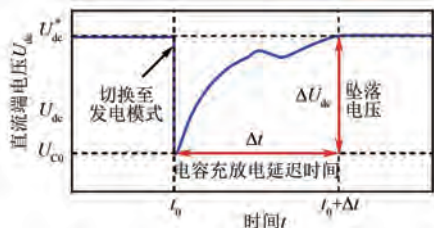


图4 切换过程中电压坠落示意图

在应用传统切换策略时,永磁起动/发电系统在由起动模式切换至发电模式的过程中,负载电容稳压并联于支路中,蓄电池支路断开。此时直流端电压 U_{dc} 与电容电压 U_c 关系为

$$U_{dc} = U_c = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} i_c / C dt + U_{c0} \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为直流端电压; U_c 为电容电压, U_{c0} 为切换初始时刻电容电压; t_0 为切换时刻; i_c 为电容电流; Δt 为电容充放电延迟时间; C 为电容值。

由于起动模式时电机对电流需求较高,电容并未充分进行预先充电^[1], U_{c0} 趋近于0,切换时刻直流端电压 U_{dc} 趋近于0。又因为式(1)等号右侧积分部分不能实现从0到给定直流端电压 U_{dc}^* 的突变,所以与电容相并联的直流端电气负载电压 U_{dc} 存在短时下跳的电压坠落现象,影响切换过程中电气负载的供电质量与系统稳定。这是由传统切换策略对应的电气负载切换结构决定的。因此,要减小切换过程中的坠落电压,必须对此结构进行优化。

1.3 发电模式转速阈值计算

当永磁起动/发电系统运行于发电模式,转速 n 不足以维持电气负载所需功率的转速阈值 n_{min} ($n < n_{min}$) 时,此时永磁起动/发电系统需要由发电

模式切换至起动模式, n_{min} 的确定方式如下。

当永磁起动/发电系统运行于发电模式时,永磁起动/发电机系统作为发电机,在采用 $i_d^* = 0$ 控制策略时,其功率传输方程为^[17]

$$\omega_e \psi_f i_q + i_q^2 R_s + \frac{2}{3} \frac{U_{dc}^2}{R_L} = 0 \quad (2)$$

式中: i_q 为电机的 q 轴电流; U_{dc} 为直流端电压; ω_e 为电机角速度; ψ_f 为转子磁链, R_s 为定子电阻; R_L 为直流端负载。

显然,式(2)是一个关于 q 轴电流 i_q 的一元二次方程,为使其有解,根据一元二次方程判别式应有 $\Delta > 0$:

$$\Delta = \frac{\omega_e^2 \psi_f^2}{4R_s} - \frac{2}{3} \frac{U_{dc}^2}{R_L} > 0 \quad (3)$$

解得发电模式转速阈值 n_{min} 为

$$n > n_{min} = \sqrt{\frac{8}{3} \frac{U_{dc}^2 R_s}{\psi_f^2 R_L}} \cdot \frac{30}{\pi p} \quad (4)$$

式中: p 为电机的极对数。

当处于发电模式的电机转速 n 低于 n_{min} ,应及时将系统由发电模式切换回起动模式,保障系统的稳定。

2 考虑电容充放电延迟的永磁起动/发电系统模式切换策略

2.1 电气负载切换结构设计

在传统切换策略的基础上,提出如图5所示的切换策略电气负载结构切换示意图,各开关信号在各运行模式下的状态如表2所示。开关信号 $g_{x(x=1,2,3)} = 0$ 时,开关断开;开关信号 $g_{x(x=1,2,3)} = 1$ 时,开关闭合。

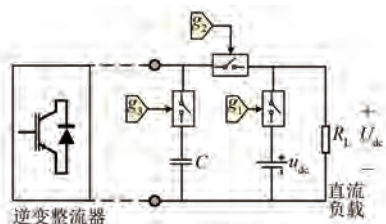


图5 考虑电容充放电延迟切换策略下的电气负载结构切换示意图

当起动/发电系统处于切换模式时,开关信号 $g_1 g_2 g_3 = 101$,此时直流负载依然由蓄电池供能,直

表 2 不同运行模式下开关信号状态

运行模式	g_1	g_2	g_3
起动模式 (mode=1)	1	1	0
切换模式 (mode=2)	1	0	1
发电模式 (mode=3)	0	1	1

流端电压 U_{dc} 与蓄电池电压 V_{dc} 相等,同时电容受起动/发电机充电,在切换持续时间 Δt 内逐渐上升接近至给定电压 U_{dc}^* 为

$$\begin{cases} U_{dc} = V_{dc} \\ U_C \rightarrow U_{dc}^* \end{cases} \quad (5)$$

当电容电压与直流负载相平后切换至发电模式。此时蓄电池支路断开,电容支路与电气负载相并联。直流端电压 U_{dc} 与电容电压 U_C 相等,与 U_{dc}^* 相近,即:

$$U_{dc} = U_C \approx U_{dc}^* \quad (6)$$

结合式(1),考虑到电容的充放电延迟,在切换模式时给予电容时间 Δt 进行充放电。因此与传统切换策略相比,所提出的切换策略能够有效降低切换过程中的坠落电压。

2.2 模式切换控制器设计

控制结构切换与电气负载结构切换的结合由图 2 中的模式切换控制器完成。通过读取永磁起动/发电系统参数与电气负载开关信号参数,模式切换控制器实现模式识别与模式切换,具体流程如下。

2.2.1 系统处于起动模式

当起动/发电机转速达到点火转速 n_0 附近持续一段时间 Δt ,即 $n \in (n_0 - \Delta n, n_0 + \Delta n)$,模式切换控制器将起动/发电系统由起动模式切换至切换模式,开关信号输出为 $g_1 g_2 g_3 = 101$ 。控制结构外环由转速环切换至电压环,外环反馈值为电容电压 U_C 。

若不满足上述条件,则系统会维持运行现状。

2.2.2 系统处于切换模式

(1) 当起动/发电机转速小于电气负载所需功率的转速阈值 n_{min} (通过式(4)计算)持续一段时间 Δt ,即 $n < n_{min}$,模式切换控制器将起动/发电系统由切换模式切换至起动模式,开关信号输出为 $g_1 g_2 g_3 = 110$,控制结构外环由电压环切换至转速环。

(2) 若不满足条件(1)情况,当电容电压 U_C

达到直流负载给定电压 U_{dc}^* 附近持续一段时间 Δt ,即 $U_C \in (U_{dc}^* - \Delta U, U_{dc}^* + \Delta U)$,模式切换控制器将起动/发电系统由切换模式切换至发电模式,开关信号输出为 $g_1 g_2 g_3 = 011$,控制结构外环反馈值为直流端电压 U_{dc} 。

若不满足条件(1)、(2),则系统会维持运行现状。

2.2.3 系统处于发电模式

当起动/发电机转速小于电气负载所需功率的转速阈值 n_{min} 持续一段时间 Δt ,即 $n < n_{min}$,模式切换控制器将起动/发电系统由发电模式切换至起动模式,开关信号输出为 $g_1 g_2 g_3 = 110$,控制结构外环由电压环切换至转速环。

若不满足上述条件,则系统会维持运行现状。

在模式切换进行后,还需要重复进行模式识别,确保模式切换控制器有足够的动态响应。对于本文所应用的永磁起动/发电系统,依据应用环境,模式切换控制器流程图如图 6 所示。本文所应用的永磁起动/发电系统,点火转速 $n_0 = 500 \text{ r/min}$,直流负载给定直流端电压 $U_{dc}^* = 24 \text{ V}$ 。

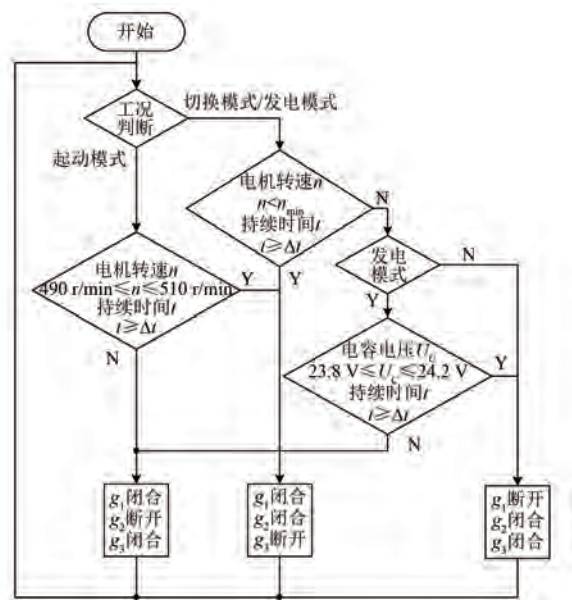


图 6 模式切换控制器流程图

3 仿真算例验证与分析

为了验证所提策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 环境中建立了永磁起动/发电机本体与

控制器的仿真模型,永磁起动/发电系统的参数如表 3 所示。

表 3 永磁起动/发电系统仿真模型参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.281
定子电感 L_s/mH	0.000 25
永磁磁链 ψ_f/Wb	0.010 6
极对数 p	21
点火转速 $n_0/(r \cdot \min^{-1})$	500
直流母线电压 U_{dc}/V	24
直流负载电阻 R_L/Ω	5.76

3.1 模式切换策略功能验证性分析

对模式切换策略进行功能验证性分析。模拟发动机转速如图 7 发生变化,起动/发电系统起动后将发动机拖动至 500 r/min 的点火转速后,在 1.2 s 时,模拟发动机发生故障,转速突降至 300 r/min,低于维持电气负载所需功率的转速阈值 n_{min} ,此时系统应切换至起动模式,由蓄电池向电气负载供电。仿真试验结果如图 8~图 11 所示。

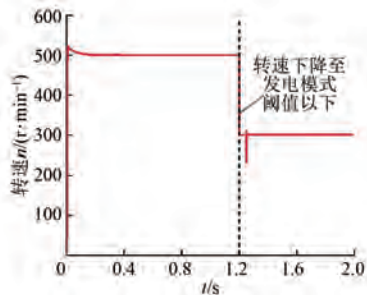


图 7 永磁起动/发电机转速 n 波形

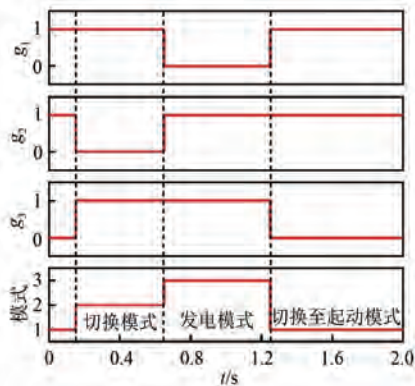


图 8 各开关信号变化示意图

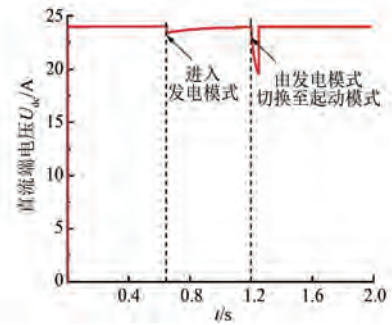


图 9 电气负载端直流端电压 U_{dc} 波形

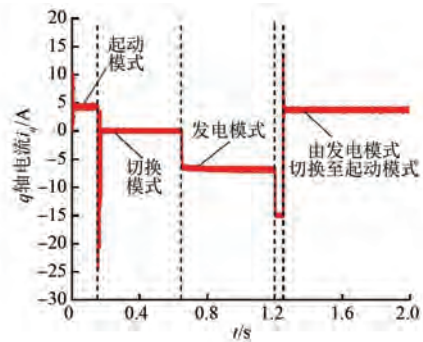


图 10 q 轴电流 i_q 波形

由图 8~图 10 可知,在 0.15~0.645 s 期间,永磁起动/发电系统处于切换模式,电气负载 R_L 仍然由蓄电池供电,因此直流端电压 U_{dc} 保持平稳,而由于开关信号 $g_2=0$,电气负载端只有并联电容与起动/发电机并联, q 轴电流 $i_q=0$ A,由电机端至负载端几乎无电磁功率。

在 0.645~1.25 s 期间,永磁起动/发电系统处于发电模式,在由切换模式切换至发电模式过程中,直流端电压出现了约 0.5 V 的坠落,并很快回升,符合本永磁起动/发电系统的性能需求。 q 轴电流 $i_q=-7.6$ A <0 ,电机受发动机拖动做功,向电气负载供电。

在 1.2~1.25 s 期间,发动机发生故障,转速下坠至 300 r/min,低于维持电气负载所需功率的转速阈值 n_{min} 。起动/发电系统仍处于发电模式,即使 q 轴电流输出增大至极值,仍无法满足电气负载的功率需求。

在 1.25 s 时,永磁起动/发电系统由发电模式切换至起动模式,此时由永磁起动/发电机拖动发动机做功,受负载端蓄电池供电, q 轴电流 $i_q>0$,

在发动机转速无法提供发电模式电机功率需求时,实现了将系统由发电模式切换回至起动模式的需求。

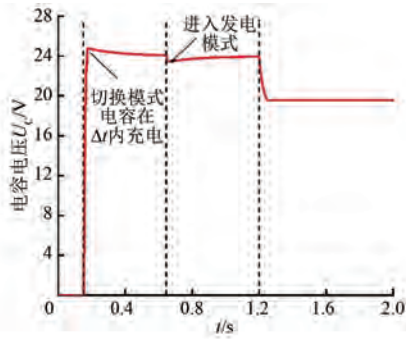


图 11 电容电压 U_c 波形

由图 11 可分析考虑电容充放电延迟在本切换策略中的作用,0.15 s 后,电容受处于发电模式的起动/发电机系统充电,但并未直接并联到电气负载 R_L 上。在考虑电容充放电延迟的永磁起动/发电系统切换策略中,直到电容逐渐充电至与负载给定电压 U_{dc}^* 相近,才将电容与电气负载相并联,电气负载由起动/发电机供电。在 1.2 s 时,也由于考虑了电容的充放电延迟,使系统即使由发电模式切换至起动模式时,不会出现严重的电压坠落现象。

3.2 模式切换策略性能对比性分析

本节所有仿真时间皆为 1 s,仿真步长为 10^{-6} s。模拟发动机转速 n 维持在 500 r/min。由于所提出的考虑充放电延迟主要针对起动模式到发电模式的切换,不再模拟发动机如图 7 所示 1.2 s 处出现发动机故障转速坠落现象,仿真试验结果如图 12~图 14 所示。

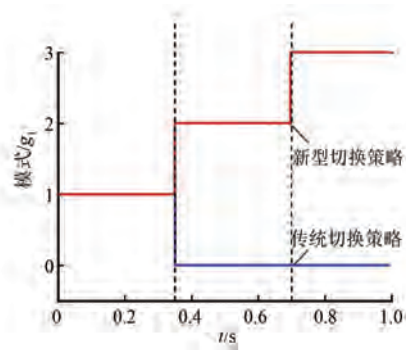


图 12 各开关信号变化示意图

由图 12 并结合表 2 可知,在传统切换策略

下,永磁起动/发电系统在 0.35 s 由起动模式直接切换至发电模式;在提出的考虑电容充放电延迟切换策略下,永磁起动/发电系统在 0.35 s 由起动模式切换至切换模式,并在 0.7 s 时由切换模式切换至发电模式。

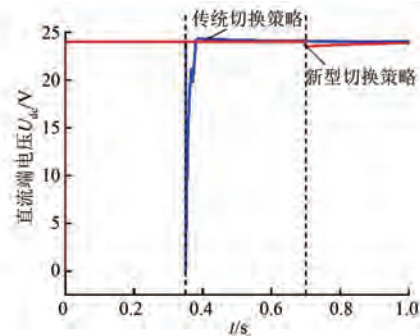


图 13 电气负载端直流端电压 U_{dc} 波形

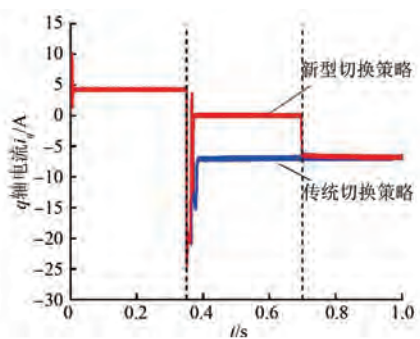


图 14 q 轴电流 i_q 波形

由图 13 与图 14 可知,在传统切换策略下,由于直接由起动模式切换至发电模式,没有考虑电容的充放电延迟时,在 0.35 s 时直流端电压 U_{dc} 发生严重坠落由 24 V 下降至约 1 V,坠落电压 ΔU_{dc} 约 23 V,这造成了重大隐患。本文提出的切换策略考虑了电容的充放电延迟,并联电容在模式切换过程中有足够的时间进行充电升压,待电容电压接近负载电压后才被并入到负载中,直流端坠落电压 ΔU_{dc} 由约 23 V 下降至仅 0.5 V,提高了系统在模式切换时的稳定性。

4 结 语

(1) 降低模式切换过程中的坠落电压,仿真结果表明,考虑电容充放电延迟过程后,利用所提出的模式切换策略几乎消除了直流端坠落电压,

由传统策略的 23 V 降低至 0.5 V, 提高了系统在模式切换时的稳定性。

(2) 通过设置发电模式转速阈值 n_{\min} , 在发动机发生故障, 转速无法维持发电模式所需功率时, 系统平稳切换至起动机模式, 提高了系统的稳定性。

【参考文献】

- [1] 龙宇航, 夏加宽, 李泽星, 等. 多旋翼油动力无人机用起/发电机的研究设计[J]. 微电机, 2020, 53(2): 7.
- [2] 李天元. 高功率密度航空永磁起动机/发电机设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [3] 史世友. 航空永磁起发电系统控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [4] 彭寒梅, 易灵芝, 朱建林. 开关磁阻发电机输出电压脉动抑制的研究及仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(5): 1237.
- [5] 刘勇智, 周政, 盛增津, 等. 开关磁阻电机起动机/发电状态切换控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(10): 57.
- [6] DING W, LIANG D. Comparison of transient and steady-state performances analysis for a dual-channel switched reluctance machine operation under different modes[J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(8): 603.
- [7] 刘路, 卜飞飞, 刘皓喆, 等. 五相感应电机起动机/发电系统起动机控制研究[J]. 微特电机, 2020, 48(9): 34.
- [8] SCARCELLA G, SCELBA G, CACCIATO M, et al. Vector control strategy for multidirectional power flow in integrated multidrives starter-alternator applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4816.
- [9] 李岩, 苏学军, 李运. 基于航空高压直流电源系统的永磁同步电机起动机发电系统设计[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 60.
- [10] PANDA D, RAMANARAYANAN V. Mutual coupling and its effect on steady-state performance and position estimation of even and odd number phase switched reluctance motor drive[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(8): 3445.
- [11] LANG X, YANG T, BAI G, et al. Active disturbance rejection control of DC-bus voltages within a high-speed aircraft electric starter/generator system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4229.
- [12] LV X, ZENG W, DING X, et al. Experimental investigation of a novel micro gas turbine with flexible switching function for distributed power system[J]. Frontiers in Energy, 2020, 14: 790.
- [13] 张晓军, 杨家强, 杨昊林. 一种基于永磁同步电机绕组铜耗功率最大的电动汽车母线电容放电方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6460.
- [14] JEON S, LEE G S, KANG D, et al. Belt-driven integrated starter and generator using planetary gears for micro hybrid electric vehicles[J]. IEEE Access, 2021, 9: 56201.
- [15] 苏航. 油动力多旋翼发电机并联电源系统控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [16] 罗宗鑫, 陈强, 薛开昶. 航空高压直流供电系统的永磁起动机发电控制方法[J]. 微电机, 2020, 53(4): 83.
- [17] 贺诗明, 熊健, 代大一, 等. 三相电压型 PWM 整流器建模、控制及稳定性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2049.

(上接第 58 页)

- [14] 沈佳明. 基于快速原型的无人机仿真系统设计与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [15] BASZYŃSKI M. Low cost, high accuracy real-time simulation used for rapid prototyping and testing control algorithms on example of BLDC motor[J]. Archives of Electrical Engineering, 2016, 65(3): 463.
- [16] 李臻博, 代林旺, 李少林, 等. 双馈风电机组电压源电流源双模式运行平滑切换控制策略[J]. 电气传动, 2022, 52(22): 13.
- [17] 郭海宇, 张晓光. 基于快速原型的新能源汽车网关控制器开发平台设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(19): 141.
- [18] 肖伟杰. 利用 DAC 芯片和运算放大器构建可编程电流源[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(1): 32.