

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220549-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220549

多电辅助动力装置用双绕组感应发电机 变频交流发电系统励磁控制技术

史建宇¹, 张宇飞², 郭子韬¹, 刘皓喆¹, 卜飞飞¹, 黄文新¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211106;

2. 中国航发控制系统研究所, 江苏 无锡 214603)

摘 要: 当飞机主电源出现故障时, 辅助动力装置 (auxiliary power unit, APU) 可作为备用电源代替故障的发电机供电。以多电辅助动力装置为背景, 研究了一种双绕组感应发电机变频交流发电系统, 并提出基于控制绕组磁链定向的变频交流励磁控制技术。该发电机定子上有两套绕组, 一套为控制绕组, 用于调节发电机励磁, 一套为功率绕组, 用于输出变频交流电能; 两套绕组仅通过磁场耦合。采用控制绕组磁链定向对控制绕组电流进行解耦, 将控制绕组电流分为无功电流和有功电流, 在此基础上分别对功率绕组侧交流电压、控制绕组侧直流电压进行控制。实验结果显示, 该系统在交流侧突增、突卸满载时, 电压突变在 ± 10 V 以内, 恢复时间不超过 1.3 s。研究成果表明: 采用该励磁控制技术能够使感应发电机平稳运行, 且交流输出电压具有良好的稳态性能和动态性能。

关 键 词: 辅助动力装置; 双绕组感应发电机; 控制绕组磁链定向; 变频交流发电; 励磁控制技术

中图分类号: V242.4; TM351

文献标志码: A

Excitation control technology of frequency conversion AC power generation system for dual-winding induction generators for multi-electric auxiliary power units

SHI Jianyu¹, ZHANG Yufei², GUO Zitao¹, LIU Haozhe¹, BU Feifei¹, HUANG Wenxin¹

(1. College of Automation Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Aero Engine Control System Institute,

Aero Engine Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214603, China)

Abstract: When the main power supply of the aircraft failed, the auxiliary power unit (APU) can be used as a backup power supply instead of the faulty generator. Taking the multi-electric auxiliary power device as the background, a double-winding induction generator variable frequency AC power generation system was studied, and a frequency conversion AC excitation control technology based on control winding flux orientation was proposed. The generator stator consisted of two sets of windings, one for the control winding, which was used to adjust the generator excitation, and the other for the power winding, which was used to output frequency conversion AC power. The two windings were coupled only by a

收稿日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(52177050); 中央高校基本科研业务费项目(NS2021019)

作者简介: 史建宇(2000—), 男, 硕士生, 研究方向为电机驱动控制。

通信作者: 卜飞飞(1984—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 研究方向为航空电源、伺服驱动、电机及其控制等。

E-mail: bufeifei1984@163.com

引用格式: 史建宇, 张宇飞, 郭子韬, 等. 多电辅助动力装置用双绕组感应发电机变频交流发电系统励磁控制技术[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220549. SHI Jianyu, ZHANG Yufei, GUO Zitao, et al. Excitation control technology of frequency conversion AC power generation system for dual-winding induction generators for multi-electric auxiliary power units[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220549.

magnetic field. The control winding current was decoupled by using the magnetic chain orientation, and the control winding current was divided into reactive current and active current, and on this basis, the power winding AC voltage and the control winding DC voltage were controlled respectively. The experimental results verified that when the AC side surged and offloaded abruptly, the voltage changed within ± 10 V and the recovery time was not more than 1.3 s. Research results showed that the excitation control technology can make the induction generator run smoothly, and AC output voltage has good steady and dynamic performance.

Keywords: auxiliary power unit; dual-winding induction generator;
control winding flux orientation; variable frequency AC power generation;
excitation control technology

辅助动力装置(auxiliary power unit, APU)是安装在飞机上的不依赖机外能源的小型燃气涡轮发动机^[1]。在飞机停于地面进行检查与维修时,它可向飞机提供电、气等能源。在飞机飞行过程中主发电机出现故障时,APU可作为备用电源代替故障的发电机供电,提高飞机供电的安全性与可靠性。APU的使用大大简化了机载设备,提高了飞机电气系统的性能与可靠性,在大型飞机中得到了广泛应用,是多电飞机发展的一种必然趋势。APU在其多种工作模式下都离不开发电系统这一核心部件,因此研究APU发电技术的重要性不言而喻。

APU作为飞机的应急电源,其供电体制应与飞机的主电源系统相匹配。在低压直流电源系统和恒频交流电源系统获得成熟应用的情况下,高压直流电源系统和变频交流电源系统成为飞机机载电源系统发展的新方向^[2]。目前,美国新一代联合攻击机F35采用了270 V高压直流电源系统,其主发电机容量为250 kVA,且同时配备了250 kVA的APU发电机^[3]。而像运输机、民用客机等大型飞机,存在像加热、除冰、照明等对频率不敏感的电气负载,用电量大,往往要占大型飞机电源总容量的一半以上,可以直接使用交流电能,例如A380、B787等大型民用飞机均采用了交流发电系统,且均配备了APU发电机^[1],其中A380采用了4台150 kVA的主发电机,工作频率为370~770 Hz,APU上有2台120 kVA的发电机,额定工作频率为400 Hz,主发电机和APU电压均为115/200 V。B787飞机上有4台250 kVA的主发电机,工作频率为360~800 Hz,APU上有2台225 kVA的发电机,工作频率为360~440 Hz,主发电机和APU电压均为230/400 V。由此可见,APU变频交流发电机目前已在大型飞机中得到

了广泛应用。

从近年来国内外研究情况来看,适宜作为航空交流发电系统的方案主要有三级式无刷同步电机发电系统、混合励磁同步电机发电系统、笼型感应发电机发电系统。三级式无刷同步发电机发电系统主要由主发电机、励磁机以及旋转整流器构成^[4]。近几十年来,国内外学者们对三级式无刷同步发电机发电系统的起动控制^[5]、无位置传感器技术^[6]以及励磁控制^[7-8]展开了一系列研究,取得了丰硕成果。混合励磁同步发电机是电励磁同步发电机与永磁同步发电机^[9-10]的结合,具有功率密度高、易实现起动发电、气隙主磁通可调等优点。南京航空航天大学张卓然教授团队针对混合励磁变频交流发电系统进行深入研究,提出了一种新型转子磁分路混合励磁同步发电机,消除了定子轴向磁路^[4]。笼型感应发电机因其无刷结构、简单坚固、可靠性高等优点得到广泛关注。美国工程院院士Lipo教授团队充分论证了基于笼型感应发电机的变速恒频交流发电系统航空应用的可行性^[11]。近十年来,国内外研究人员还验证了感应电机作为航空高压直流发电机的优势^[12-14]。此外,美国工程院院士Rajashekara教授团队等也专门对笼型感应发电机作为APU用发电机的可行性开展了一系列研究^[15-16],具有良好的应用前景。但针对笼型感应发电机作为APU用变频交流发电机研究内容较少,且笼型感应发电机^[17]存在变换器容量大、体积大、励磁不易调节等不足。双绕组感应发电机(dual winding induction generator, DWIG)是本世纪初提出的一种新型感应电机,它既继承了传统感应发电机的优点,又克服了其不足,引起了广泛关注。该发电机定子上有两套绕组,一套为控制绕组,接有励磁变换器,用以调节发电机励磁;一套为功率绕

组, 专门为负载供电^[18]。国内海军工程大学的马伟明院士研究团队及其合作的清华大学研究组对 DWIG 直流发电系统展开了大量富有成果性的研究^[19-21]。南京航空航天大学研究团队提出了一种变速运行的 DWIG 直流发电系统, 并对该系统应用在多电飞机、风力发电等不同变速场合时的系统优化^[22]、控制策略^[23-24]等问题进行了研究, 并取得了丰硕成果。

以上研究主要针对 DWIG 应用于直流发电系统, 为将 DWIG 发电系统拓展到多电飞机航空变频交流发电应用领域, 本课题研究团队研究一种 DWIG 变频交流发电系统作为航空变频交流发电系统的一个可选方案。而要充分发挥 DWIG 的优势, 就离不开它所采用的控制策略, 由于其拥有两套绕组, 需要同时对两套绕组的端电压同时进行控制, 且控制绕组侧需要控制直流母线电压, 功率绕组侧需要控制交流电压, 使得控制策略较为复杂。本文以多电辅助动力装置为背景, 对

DWIG 变频交流发电系统进行研究, 提出一种基于控制绕组磁链定向的变频交流发电励磁控制技术, 仿真和实验验证了所提控制技术的有效性和可行性。

1 双绕组感应发电机系统简介

DWIG 交流发电系统拓扑结构图如图 1 所示, 该发电机的转子为笼型无刷结构, 简单坚固。其定子上有两套三相绕组, 一套为控制绕组, 接有滤波电感 L 和电力电子变换器又称为静止励磁变换器 (static excitation converter, SEC), 直流母线接有母线电容 C_{cdc} ; 另一套为功率绕组, 接有励磁电容 C 和交流负载。发电机所需要的励磁无功由功率绕组侧励磁电容和控制绕组侧励磁变换器共同提供, 功率绕组输出恒压变频交流电能。两套绕组极对数和绕组形式相同, 在电气上无直接连接, 仅通过磁场耦合, 功能分开, 易于实现高性能控制和输出高品质电能。图中 D 为二极管。

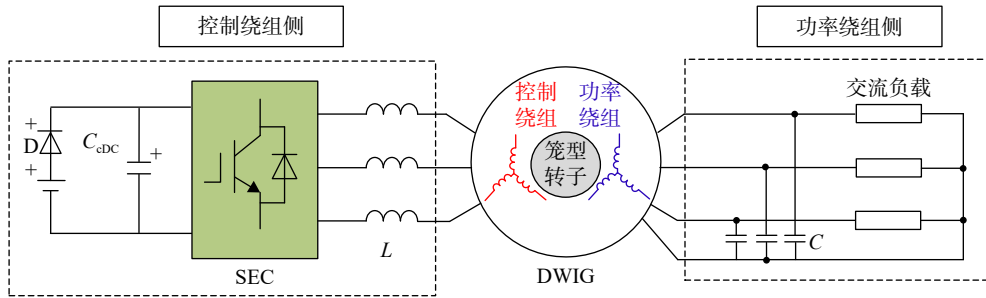


图 1 DWIG 交流发电系统

Fig. 1 DWIG AC power generation system

2 励磁控制策略

DWIG 控制绕组磁链定向控制的矢量图如图 2 所示。

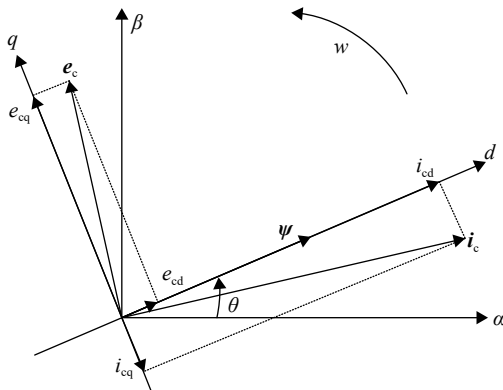


图 2 控制绕组磁链定向矢量

Fig. 2 Control winding flux orientation vector

DWIG 正常运行情况下, 控制绕组等效电阻上的压降远小于其控制绕组反电动势, 所以可以把它忽略, 得到控制绕组电压为:

$$u_c \approx -e_c = -\left(-\frac{d\psi}{dt}\right) = \frac{d\psi}{dt} e^{j\omega t} + j\omega\psi \quad (1)$$

式中 u_c 为控制绕组电压矢量; e_c 为控制绕组的反电动势矢量; ψ 为磁链矢量; ψ 为 ψ 的幅值。 u_c 幅值 u_c 可表示为

$$u_c = u_{cd} + j u_{cq} = \frac{d\psi}{dt} + j\omega\psi \quad (2)$$

在系统稳定时, 磁链幅值不变, 此时 $d\psi/dt = 0$ 。根据瞬时功率理论, 可以得到在如图 2 所示的磁链定向旋转坐标系中, DWIG 控制绕组瞬时有功功率与无功功率表示为, 其中 i_{cd} 和 i_{cq} 分别为控制绕组 d 、 q 轴电流, 其中 u_{cd} 和 u_{cq} 分别为控制绕

组 d 、 q 轴电压, ω 为同步角频率。

$$\begin{cases} p = u_{cd}i_{cd} + u_{cq}i_{cq} = \frac{d\psi}{dt}i_{cd} + \omega\psi i_{cq} \approx \omega\psi i_{cq} \\ q = -u_{cd}i_{cq} + u_{cq}i_{cd} = -\frac{d\psi}{dt}i_{cq} + \omega\psi i_{cd} \approx \omega\psi i_{cd} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得:

$$\frac{p}{q} \approx \frac{i_{cq}}{i_{cd}} \quad (4)$$

由式(4)可知, 当 DWIG 工作于稳定运行状态下, 调节 i_{cq} 即可控制系统有功功率, 调节 i_{cd} 即可控制系统无功功率, 而调节 i_{cd} 、 i_{cq} 的方式可以直接通过采用 PI 调节器实现。

磁链定向控制策略, 电流调节是基础, 最终目的是调节输出电压的稳定, 由于 DWIG 功率绕组漏抗上的压降很低, 可将其忽略, 功率绕组交流侧电压为:

$$u_{pAC} \approx E_p = 4.44f_1 K_w \psi_p \quad (5)$$

其中 E_p 为功率绕组感应电动势有效值; f_1 为同步频率; K_w 为功率绕组系数; ψ_p 为功率绕组磁链, 在 DWIG 系统中, 控制绕组与功率绕组共用气隙磁场, 所以它的大小与励磁无功 p 关系为

$$\psi_p = \sqrt{q \cdot \frac{L_c}{\omega}} \quad (6)$$

式中 L_c 为控制绕组自感。由式(4)~式(6)可通过调节无功电流 i_{cd} , 控制 SEC 向发电机提供的励磁无功, 来调节气隙磁通, 从而达到控制功率绕组电压 u_{pAC} 的目的。

在 SEC 工作时, 由于其开关损耗以及线路电

阻会产生有功损耗, 导致 DWIG 控制绕组侧直流母线电压 u_{cDC} 波动, 影响 SEC 的正常工作。因此, 需要对于 u_{cDC} 进行控制, 它与电磁转矩关系如下:

$$u_{cDC} = \sqrt{T_{ec}\omega R_e} \quad (7)$$

式中 R_e 表示 SEC 开关损耗的等效电阻与回路电阻之和; 表示控制绕组电磁转矩, 当电机处于发电工作状态下时, $T_{ec} < 0$, 它与有功功率 p 有如下关系:

$$T_{ec} = p \cdot n_p / \omega \quad (8)$$

式中 n_p 为电机极对数, 由式(4)、式(7)、式(8)可知, DWIG 可以通过调节有功电流 i_{cq} 控制有功功率, 来改变控制绕组电磁转矩 T_{ec} , 从而实现对于控制绕组直流母线电压 u_{cDC} 的控制。

最终可得 DWIG 控制绕组磁链定向控制原理如图 3 所示, u_{cDC} 可由 T_{ec} 进行调节, 而 u_{pAC} 可由 ψ_p 进行调节。 T_{ec} 由 p 进行调节, ψ_p 由 q 进行调节。 p 由 i_{cq} 调节, 而 q 由 i_{cd} 调节。

综合上述分析, 得到图 4 所示的基于 DWIG 控制绕组磁链定向的励磁控制系统框图。

控制绕组侧直流母线电压和功率绕组侧交流电压可以分别由控制绕组电磁转矩和磁链来进行控制, 控制绕组转矩和磁链可以分别由控制绕组

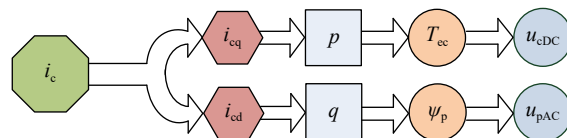


图 3 控制绕组磁链定向控制原理

Fig. 3 Control principle of control winding flux orientation

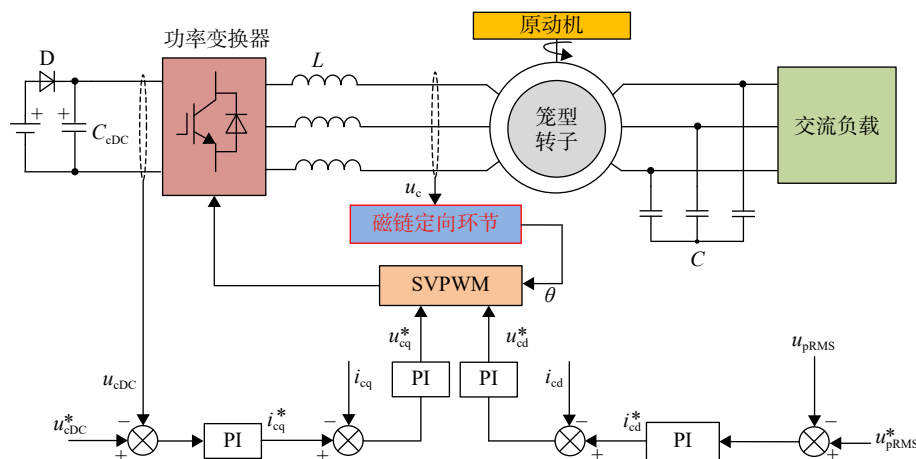


图 4 基于控制绕组磁链定向的变频交流发电励磁控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of the excitation control system of the variable frequency AC power generation based on control winding flux orientation

有功功率和无功功率来控制, 而控制绕组有功功率和无功功率又可以由控制绕组有功电流和无功电流进行控制, 所以最终如图 4 所示可通过对控制绕组有功电流和无功电流的调节实现对控制绕组侧直流母线电压 u_{dC} 和功率绕组侧交流电压 u_{pAC} 的控制。

3 仿真结果

为验证本文所提出的基于控制绕组磁链定向的变频交流发电励磁控制技术的有效性和可行性, 通过 Matlab/Simulink 搭建了仿真模型, 进行仿真验证, 仿真所用样机相关参数见表 1。

表 1 样机参数

Table 1 Prototype parameters

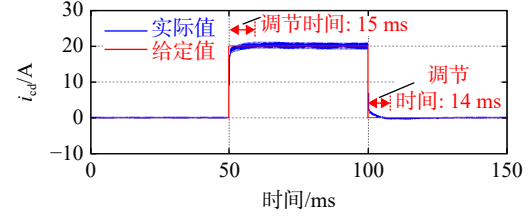
参数	数值
极对数	3
额定功率/kVA	15
额定转速/(r/min)	8 000
交流额定电压有效值/V	115
直流母线额定电压/V	270
直流母线电容 $C_{\text{dC}}/\mu\text{F}$	4 000
励磁电容 $C/\mu\text{F}$	40
滤波电感 L/mH	0.585
激磁电感 L_{m}/mH	1.058
控制绕组电阻 R_{c}/Ω	0.033 2
控制绕组漏感 $L_{\text{c}}/\mu\text{H}$	66.4
功率绕组电阻 R_{p}/Ω	0.023 7
功率绕组漏感 $L_{\text{p}}/\mu\text{H}$	66.4
转子等效绕组电阻 R_{r}/Ω	0.030 4
绕组有效匝比 $(N_{\text{p}}/N_{\text{c}})$	1.5

3.1 电流控制性能仿真

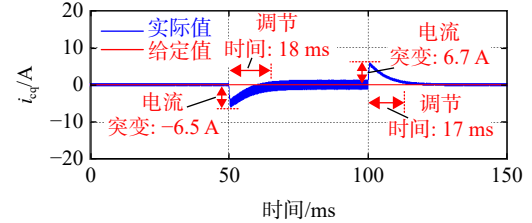
为了检验本文所提出的基于控制绕组磁链定向的变频交流发电励磁控制技术的电流控制性能, 在仿真平台进行仿真验证。在 $t=50\text{ ms}$ 和 $t=100\text{ ms}$ 时刻, 分别对控制绕组 d 轴电流 (i_{cd}) 进行 20 A 的阶跃突加与突卸。得到如图 5 所示 DWIG 在 i_{cd} 突加、突卸时的电流响应的仿真结果。

如图 5(a) 所示, i_{cd} 在突加、突卸时调节到给定值的时间分别约为 15 ms 和 14 ms; 由于 i_{cq} 和 i_{cd} 存在耦合, 如图 5(b) 所示, i_{cq} 在 i_{cd} 突加时产生了约 -6.5 A 的电流突变, 其调节时间约为 18 ms; 而在 i_{cd} 突卸时产生了约 6.7 A 的电流突变, 其调节时间约为 17 ms。

为了验证所提控制策略在控制绕组 q 轴电流



(a) 采用PI控制时 i_{cd} 的响应



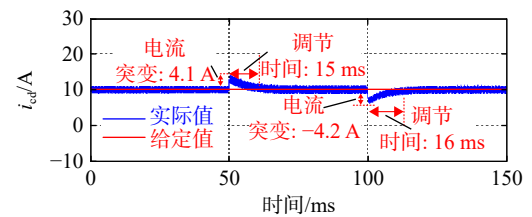
(b) 采用PI控制时 i_{cq} 的响应

图 5 i_{cd} 突变时电流响应

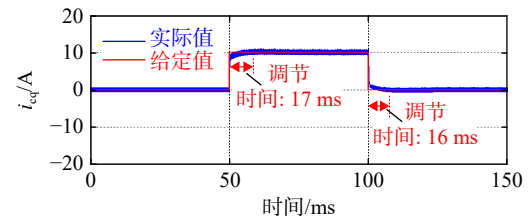
Fig. 5 Current response when i_{cd} is abruptly changed

(i_{cq}) 突加、突卸时仍然有着同样的控制效果。 i_{cd} 给定值保持在 10 A, 在 $t=50\text{ ms}$ 和 $t=100\text{ ms}$ 时刻, 分别对 i_{cq} 进行 10 A 的阶跃突加与突卸。得到如图 6 所示 DWIG 在 i_{cq} 突加、突卸时的电流响应的仿真结果。

如图 6(b) 所示, i_{cq} 在突加、突卸时调节到给定值的时间分别约为 17 ms 和 16 ms; 由于 i_{cd} 和 i_{cq} 存在耦合, 如图 6(a) 所示, i_{cd} 在 i_{cq} 突加时产生了约 4.1 A 的电流突变, 其调节时间约为 15 ms; 而在 i_{cq} 突卸时产生了约 -4.2 A 的电流突变, 其调节时间约为 16 ms。



(a) i_{cd} 的响应



(b) i_{cq} 的响应

图 6 i_{cq} 突变时电流响应

Fig. 6 Current response when i_{cq} is abruptly changed

3.2 电压控制性能仿真

为了检验本文所提出的基于 DWIG 控制绕组

磁链定向的变频交流发电励磁控制技术的电压控制性能,在仿真平台进行仿真验证。

图 7 给出了双绕组感应发电机在 8 000 r/min 下,采用所提电压控制策略的仿真结果。可以看出,交流侧在 0.1 s 内完成建压并逐渐稳定,在 0.2 s 时刻,对交流侧进行突加负载,交流电压有效值出现明显电压跌落,其跌落值约为 3 V,此时电压动态恢复时间约 320 ms。由三相交流电压波形也可以看出,三相电压在加载时有明显地跌落且缓慢地恢复至额定值 115 V。

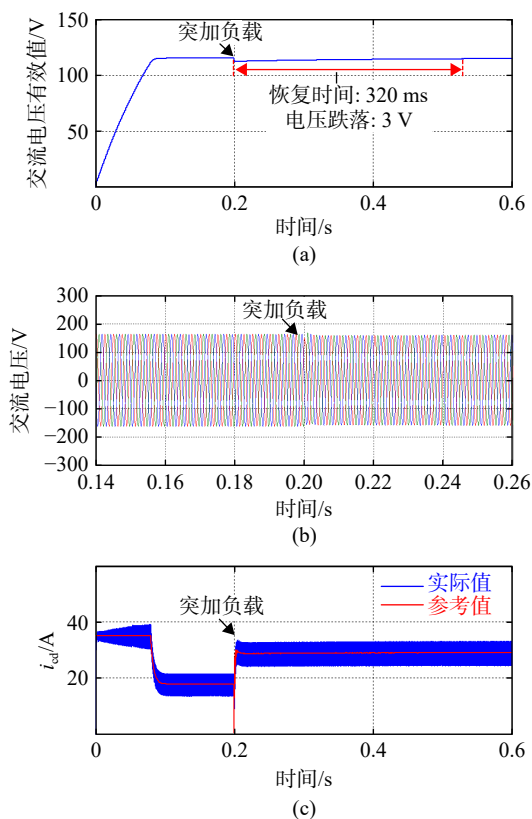


图 7 采用所提控制技术的仿真结果

Fig. 7 Simulation results using the proposed control strategy

4 实验结果

为了检验本文所提出的基于控制绕组磁链定向的变频交流发电励磁控制技术的效果,搭建了 DWIG 变频交流发电系统实验平台,实验平台包括一台 15 kW 双绕组感应发电机、一台变频器、一台原动机、主功率模块、数字控制模块、采样调理电路、驱动电路及故障保护电路等。

数字控制模块由 TI 公司的 TMS320F28335 型 DSP 芯片、Altera 公司的 EP4CE15 型 FPGA 以及 Lattice 公司的 iM4A5-128 型 CPLD 共同组成。

其中 DSP+FPGA 负责控制算法的实现,而 CPLD 负责 PWM 波的逻辑综合和保护。数字控制模块辅以外围电路组成 DWIG 数字控制器。图 8 为实验硬件平台。图 9 为 DWIG 和原动机。



图 8 DWIG 实验硬件平台

Fig. 8 DWIG experiment with hardware platforms

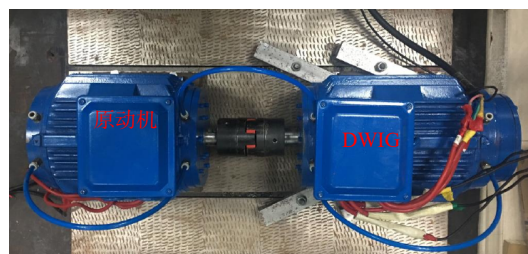


图 9 DWIG 和原动机

Fig. 9 DWIG and prime mover motor

在该实验平台分别进行了电流控制响应实验、电压控制响应实验。

4.1 电流控制响应实验

图 10、图 11 给出了 DWIG 在控制绕组 d 轴、 q 轴电流 (i_{cd} 、 i_{cq}) 突加、突卸时的电流环动态响应实验结果。

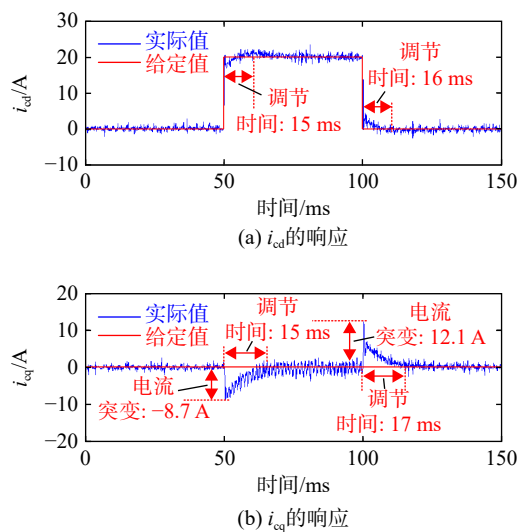
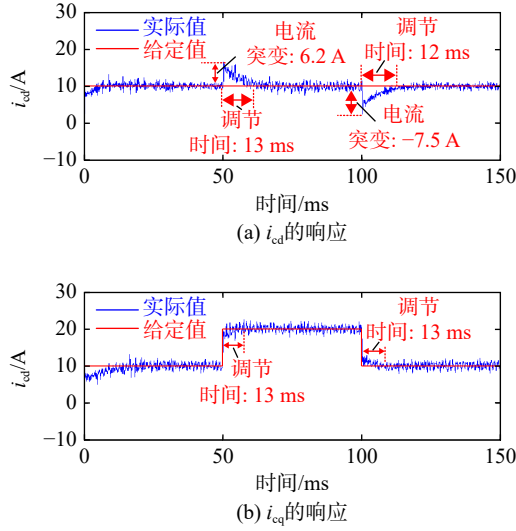


图 10 i_{cd} 突变时电流响应

Fig. 10 Current response when i_{cd} is abruptly changed

图 11 i_{cq} 突变时电流响应Fig. 11 Current response when i_{cq} is abruptly changed

如图 10 所示,在 $t=50\text{ ms}$ 和 $t=100\text{ ms}$ 时刻,分别对 i_{cd} 进行 20 A 的阶跃突加与突卸。如图 10(a) 和图 10(b) 所示,在采用 PI 电流控制时, i_{cd} 在突加、突卸时调节到给定值的时间分别约为 15 ms 和 16 ms; i_{cq} 在 i_{cd} 突加时的调节时间约为 15 ms, 电流突变为约 -8.7 A, i_{cq} 在 i_{cd} 突卸时的调节时间约为 17 ms, 电流突变约 12.1 A。

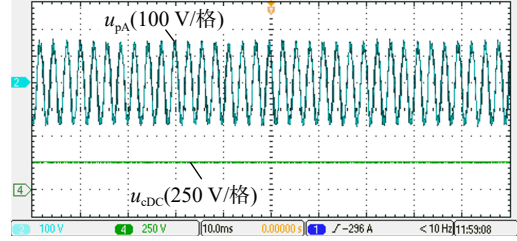
如图 11 所示,在 $t=50\text{ ms}$ 和 $t=100\text{ ms}$ 时刻,分别对 i_{cq} 进行 10 A 的阶跃突加与突卸。如图 11(a) 和图 11(b) 所示,在采用 PI 电流控制时, i_{cd} 在 i_{cq} 突加时的调节时间约为 13 ms, 电流突变约 6.2 A, 在 i_{cq} 突卸时调节时间约为 12 ms, 电流突变约 -7.5 A; i_{cq} 在突加、突卸时调节到给定值的时间约为 13 ms。

实验结果表明,当 DWIG 在控制绕组 d 轴、 q 轴电流(i_{cd} 、 i_{cq})突加、突卸时,采用所提控制策略,电流控制具有良好的动态性能。

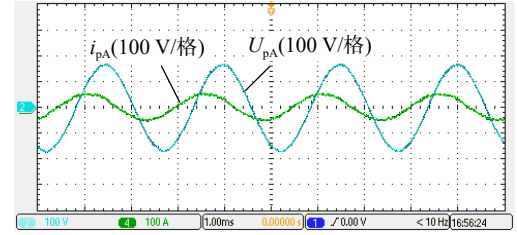
4.2 电压控制响应实验

为了检验本文所提出的基于控制绕组磁链定向的变频交流发电励磁控制技术在 DWIG 带额定负载时的稳态性能,在实验平台上进行了稳态实验。图 12 给出了在 8000 r/min 下带额定 15 kW 负载采用所提控制策略时的稳态实验结果。

图 12(a) 中分别给出了稳态时功率绕组 A 相电压与控制绕组直流母线电压,图 12(b) 中给出稳态时功率绕组 A 相电压 U_{pA} 与该相相电流 i_{pA} 。可以看出, DWIG 在稳态带额定 15 kW 负载运行时,控制绕组直流母线电压稳定在 270 V,功率绕组输出三相交流电压有效值为 115 V,三相电流



(a) 稳态时功率绕组 A 相电压与控制绕组直流母线电压



(b) 稳态时功率绕组 A 相电压与电流

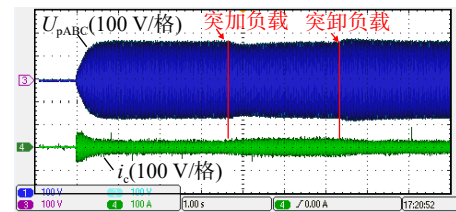
图 12 采用所提控制技术的交流电压稳态实验结果

Fig. 12 Steady-state experimental results of AC voltage using the proposed control strategy

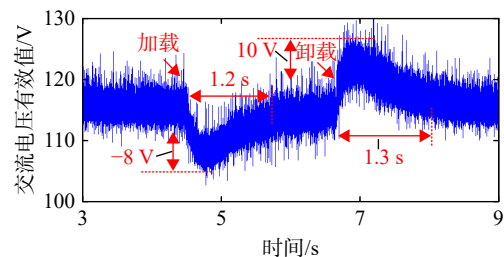
有效值约为 44 A, 且电压和电流均能保持稳定。

为了检验本文所提控制策略的在交流侧负载突加、突卸时的动态性能,在实验平台上进行了电压控制响应实验。图 13 给出了采用所提控制技术的交流电压动态实验结果。

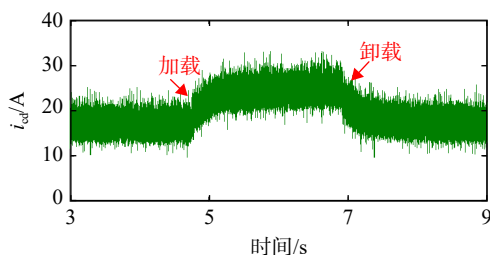
图 13(a) 中,通道 1 至通道 3 分别为功率绕组三相交流相电压,通道 4 为控制绕组 a 相电流。由图 13(a) 可以看出,交流电压经过约 500 ms 完成建压,且无明显超调。图 13(b)、图 13(c) 分别给出了交流电压在突加、突卸额定 15 kW 负载时交流电压有效值和控制绕组 d 轴电流(i_{cd})的响应波形。可以看出,突加负载时的交流电压有效值波动约为 -8 V,恢复时间约为 1.2 s; 而突卸负载



(a) 动态实验波形



(b) 突加、突卸额定负载时交流电压有效值



(c) 突加、突卸额定负载时控制绕组d轴电流 i_{cd}

图 13 采用所提控制技术的交流电压动态实验结果

Fig. 13 Dynamic experimental results of AC voltage using the proposed control strategy

时交流电压有效值波动约为 10 V, 恢复时间约为 1.3 s, 具有良好的动态性能。

5 结 论

本文以多电辅助动力装置为背景, 针对 DWIG 变频交流发电系统拓扑提出一种基于控制绕组磁链定向的变频交流发电电磁控制技术, 将控制绕组电流根据磁链定向原理分为无功电流 i_{cd} 和有功电流 i_{cq} , 进而控制无功功率和有功功率, 从而控制绕组磁链和转矩, 进而对功率绕组侧交流电压 u_{pac} 和控制绕组侧直流母线电压 u_{cdc} 进行控制。运用该控制策略对 DWIG 变频交流发电系统进行了电流控制性能仿真、电压控制性能仿真、电流控制响应实验、电压控制响应实验。验证了该控制策略能够使双绕组感应发电机平稳运行, 在 8 000 r/min 下稳定发出 115 V 交流电压, 且在负载突加、突卸时具有良好的动态性能。

参考文献:

- [1] 仇小杰, 张宇飞, 文彬鹤. 辅助动力装置控制系统传感器智能解析冗余方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1177-1187. QIU Xiaojie, ZHANG Yufei, WEN Binhe. Intelligent analytical redundancy method of control system sensors based on APU[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1177-1187. (in Chinese)
- [2] 张卓然, 许彦武, 于立, 等. 多电飞机高压直流并联供电系统发展现状与关键技术[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 624069. ZHANG Zhuoran, XU Yanwu, YU Li, et al. Parallel HVDC electric power system for more-electric-aircraft: state of the art and key technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 624069. (in Chinese)
- [3] 秦海鸿, 严仰光. 多电飞机的电气系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016. QIN Haihong, YAN Yangguang. Power system for more electric aircraft[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2016. (in Chinese)
- [4] 张卓然, 于立, 李进才, 等. 飞机电气化背景下的先进航空电机系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 622-634. ZHANG Zhuoran, YU Li, LI Jincai, et al. Key technologies of advanced aircraft electrical machine systems for aviation electrification[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(5): 622-634. (in Chinese)
- [5] 焦宁飞. 基于两相励磁机的多级式无刷同步起动/发电系统起动阶段关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017. JIAO Ningfei. Research on key technologies of multi-stage brushless synchronous starter/generator based on two-phase exciter in the starting mode[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)
- [6] GRIFFO A, DRURY D, SAWATA T, et al. Sensorless starting of a wound-field synchronous starter/generator for aerospace applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3579-3587.
- [7] 魏佳丹, 杨溢伟, 周波, 等. 三级式同步电机起动过程交流励磁一体化控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 138-146. WEI Jiadan, YANG Yiwei, ZHOU Bo, et al. The integrated AC-DC excitation control method for the three-stage synchronous machine in the starting processing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 138-146. (in Chinese)
- [8] 张赞. 三级式航空无刷同步电机三相交流励磁技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018. ZHANG Zan. Research on excitation technologies of three-phase brushless asynchronous exciter for aircraft brushless synchronous starter/generator[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [9] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 75-85. FENG Zimu, SUN Guoqiang, TENG Dehong, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 75-85. (in Chinese)
- [10] 姜哲, 卜飞飞, 潘子昊, 等. 永磁同步电机伺服系统改进型无差拍电流控制算法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 177-183. JIANG Zhe, BU Feifei, PAN Zihao, et al. Improved deadbeat current control algorithm for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 177-183. (in Chinese)
- [11] ALAN I, LIPO T A. Starter/generator employing resonant-converter-fed induction machine: II Hardware prototype[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4): 1319-1329.
- [12] BOJOI R, CAVAGNINO A, TENCONI A, et al. Control of shaft-line-embedded multiphase starter/generator for aero-engine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 641-652.
- [13] 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): 4816-4826.
- [14] 胡育文. 异步电机(电动、发电)直接转矩控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012. HU Yuwen. Direct torque control system of asynchronous motor (electric, power generation)[M]. Beijing: China Machine Press, 2012. (in Chinese)
- [15] RAJASHEKARA K, JIA Yijiang. An induction generator based auxiliary power unit for power generation and management system for more electric aircraft[C]/2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, US: IEEE, 2016: 1-7.
- [16] JIA Y, PRASANNA U R, RAJASHEKARA K. An open-end winding induction generation system for frequency insensitive AC loads in more electric aircraft[C]/IECON 2014 - 40th Annual Con-

- ference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, US: IEEE, 2014: 410-416.
- [17] 周涛, 刘子诚, 陈中, 等. 异步电机频率支撑能力分析及其等效惯量评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 18-24, 107.
ZHOU Tao, LIU Zicheng, CHEN Zhong, et al. Frequency support capacity of asynchronous motor and its equivalent inertia evaluation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 18-24, 107. (in Chinese)
- [18] OJO O, DAVIDSON I E. PWM-VSI inverter assisted stand-alone dual stator winding induction generator[C]//Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting. Piscataway, US: IEEE, 1999: 1573-1580.
- [19] MA Weiming, WANG Dong, ZHANG Botao, et al. A high speed induction generator based on power integration techniques[C]//Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference. Piscataway, US: IEEE, 2005: 2272-2279.
- [20] 傅玉, 马伟明, 王东, 等. 新型定子双绕组自激异步发电机的电压调节[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 121-125.
FU Yu, MA Weiming, WANG Dong, et al. Voltage regulation of a novel stand-alone dual stator winding induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 121-125. (in Chinese)
- [21] 张波涛, 马伟明, 王东, 等. 3 相定子电压定向的 12/3 相双绕组异步发电机励磁控制的实现[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 135-138.
ZHANG Botao, MA Weiming, WANG Dong, et al. Implementation of the excitation control with 3 phase stator voltage oriented in the 12/3 phase double-winding induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 135-138. (in Chinese)
- [22] BU Feifei, HU Yuwen, HUANG Wenxin, et al. Wide-speed-range-operation dual stator-winding induction generator DC generating system for wind power applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 561-573.
- [23] XU Haijun, BU Feifei, HUANG Wenxin, et al. Control and performance of five-phase dual stator-winding induction generator DC generating system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5276-5285.
- [24] 李勇, 胡育文, 陈光辉, 等. 基于直接功率控制的定子双绕组感应发电机系统电压调节技术[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(26): 111-117.
LI Yong, HU Yuwen, CHEN Guanghui, et al. Voltage regulation for the dual stator-winding induction generator based on the direct power control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(26): 111-117. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)