

基于定子双绕组异步发电机的交直流混合发电系统

史经奎 卜飞飞 黄文新 胡育文 李朋

(南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室 南京 210016)

摘要 提出了一种基于定子双绕组异步发电机(DSWIG)的交直流混合发电系统。该发电系统能同时输出稳定的变速、变频交流电和高压直流电。系统采取标量型瞬时转差频率控制策略。实验采用一台18kW的双绕组发电机验证了该发电方案的可行性。实验结果显示，该交直流混合发电系统能够在1:3的宽转速范围内稳定恒功率运行，且具有优秀的动、静态品质。例如，交流输出电压在突加、突卸100%额定负载时，恢复时间小于10ms，大大低于美军标70ms的规定。初步研究成果表明，基于定子双绕组异步发电机的交直流混合发电系统能够为机载、车载等独立电源场合提供有竞争力的解决方案。

关键词：交直流混合发电系统 定子双绕组异步发电机 瞬时转差频率控制 电力集成
中图分类号：TM361

AC&DC Hybrid Power Supply System Based on Dual Stator-Winding Induction Generator

Shi Jingkui Bu Feifei Huang Wenxin Hu Yuwen Li Peng

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016 China)

Abstract In this paper, an AC&DC hybrid power supply system based on dual stator winding induction generator (DSWIG) is proposed. AC and DC power with variable frequency can be generated at the same time by this system. The instantaneous slip frequency based control is adopted here. Experiment on an 18kW DSWIG has been implemented to validate the proposed power supply system. The result shows that this system could operate with wide speed range of 1:3 in the constant power zone with excellent dynamic and steady state performances. Typical features include that the recovery time is less than 10ms when 100% rated AC load is suddenly applied and removed, which is less than the American Military Standard of 70ms. The preliminary achievements indicate that this AC&DC hybrid power supply system is a competitive solution for the airborne, automotive and other independent power supply applications.

Keywords: AC&DC hybrid power supply system, dual stator winding induction generator, instantaneous slip frequency based control, power system integration technique

0 引言

航空电源经历了低压直流电源、恒速恒频交流电源和变速恒频交流电源发展阶段^[1-5]。随着多电

及全电飞机的发展，为了适应航空系统对电源品质和容量不断提高的要求，270V高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)发电系统和变速变频(Variable Speed Variable Frequency, VSVF)交流发电系统得到越来越多的重视^[6-11]。HVDC发电系统重量轻、效率高、费用低且易于并联，形成多度供电^[5-7]。美国的F-14A战斗机、S-3A和P-3C反

国家高技术研究发展计划(863计划)(2008AA05Z411)，国家自然科学基金(51277095)和航空科学基金(2012ZC52048)资助项目。

收稿日期 2014-01-05 改稿日期 2014-03-10

潜机等局部采用了这种供电技术, F-22 飞机采用 65kW HVDC 电源作为主电源系统。实际上, 虽然多电及全电飞机用电容量大大增加, 但是其中有 50% 以上的负载属于加热除冰和照明设备, 这些设备对电源频率不是特别敏感, 针对这些负载, 恒频电源系统并不是最优选择^[10]。因此许多学者提出了 VSVF 电源方案^[8-10]。作为交流电源, VSVF 电源具有与恒频电源同样优秀的供电质量, 但其效率高达 90% 以上, 功率密度高, 重量轻, 价格低, 系统安全可靠和维护性更好^[5,8-10], 作为多电飞机的重要电源形式, 已经在波音 787、空客 A380 上得到应用^[5]。可见, HVDC 和 VSVF 将是未来航空电源的研究重点。但是飞机仅采用高压直流电源必将带来用电体制的改变, 影响现有设备的继承性及机电产品的成本; 如果仅采用变频交流电源, 又无法适应某些对频率敏感设备的要求^[5]。所以, 各种供电体制都有不足, 而将他们有机结合起来形成多种电源形式共存的混合电源系统则是很好的解决方案^[5,8,11]。本文提出的发电系统能够兼顾 HVDC 和 VSVF, 将这两种发电系统进行电力集成, 实现直流和交流容量的灵活分配, 可以很好地满足机载、车载等对高压直流和变频交流电源或其混合形式的要求。

早在 2002 年, 中国海军工程大学马伟明院士就提出了电力集成 (Power System Integration Technique, PSIT) 技术^[12,13], 即将功率系统中的发电、配电和电能变换等模块中的两个或多个集成于一体, 从而实现电力设备的高功率密度、高可靠性、高性能、高效率和低成本^[12,13]。这也是本文的出发点之一。

作为独立电源系统, 笼型转子异步发电机由于其结构简单、牢固、可靠, 鲁棒性强, 成本低, 能实现启动/发电双功能, 动态性能优秀和运行转速范围宽, 带不平衡负载能力强, 且具有过载及短路能力, 越来越受到人们重视^[14-16]。美国 NASA Lewis 研究中心的专家和 T. A. Lipo 教授也推荐采用异步发电机作为航空用起动/发电系统发电机^[17-19]。事实上, 自从电力电子技术取代了原有的电容励磁的方案后, 异步发电机的动、静态性能就得到了极大的提升^[16-19]。以本文的发电系统为例, 系统可以在突加、突卸额定交流负载时达到 10ms 以内的动态恢复时间, 低于美军标 MIL-STD-704F 中 70ms 的要求^[20], 同时具有优秀的稳态电压品质。

为了满足航空电源发展的需求, 本文提出了基于定子双绕组异步发电机 (Dual Stator Winding

Induction Generator, DSWIG) 的交直流混合发电系统。该系统利用一台双绕组异步发电机, 同时发出直流电和交流电。如图 1 所示, 该发电机有两套绕组, 即控制绕组和功率绕组, 两套绕组共享发电机的磁场。系统借助励磁变换器能量双向流动的特性, 向直流负载提供稳定的电磁功率, 称为直流侧; 系统通过功率绕组输出恒压、变频交流电, 称为交流侧。本文提出了针对该发电系统的瞬时转差频率控制策略。该控制策略不需要复杂的坐标变换、磁链和转矩观测, 简单、可靠、鲁棒性强且动、静态性能优秀。

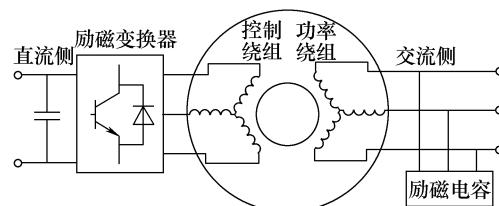


图 1 DSWIG 结构示意图

Fig.1 The structure of DSWIG

1 系统结构及拓扑的对比分析

1.1 可能的结构

实现交直流混合发电的方式有多种。图 2 所示是 12/3 相同步发电机交直流混合发电系统。该发电系统由马伟明教授提出^[12,13]。发电机内部设置交流绕组和整流绕组, 交流绕组感应出变频、交流电能, 供给交流负载; 整流绕组通过 12 相整流输出直流电能。该交直流混合发电系统与交直流分别供电的两台发电机组相比, 体积、重量和工程造价都减少了 40% 以上^[12,13]。

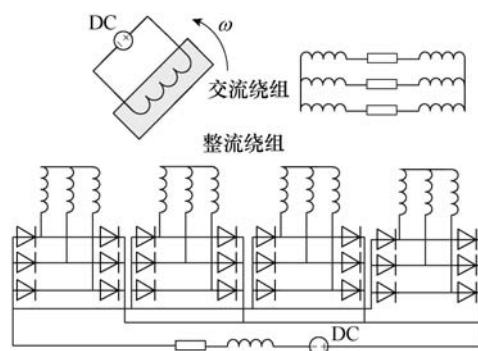


图 2 基于电力集成思想的同步发电机
交直流混合供电系统

Fig.2 Schematic circuit of the AC and rectified DC synchronous generator based on PSIT

但是该系统仍然具有同步发电机固有的问题, 比如, 由于励磁绕组较大的时间常数, 其动态性能

不甚理想，突加（卸）规定负载时，交流电压跌落（上升）11.04（11.8）%，电压恢复时间为0.56（0.6）s^[13]，当应用于航空电源系统时，无法满足美军标 MIL-STD-704F 对于航空电源动态性能的要求^[20]。

图3所示的发电系统采用笼型异步发电机，通过励磁变换器一方面给发电机提供励磁，另一方面将电能整流输出到直流母线；通过逆变器输出交流电能。这种方式能够输出恒压、恒频交流电能。优点是直流电压控制和交流电压控制相对独立，便于设计控制环路；运行转速范围较宽，能够运行于恒转矩区和恒功率区。但是这种方式需要全功率变换，功率器件的容量较大，并且逆变器交流电压输出最大值受到直流电压的限制。

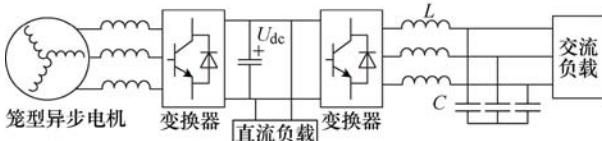


图3 全功率变换器的交直流发电方案

Fig.3 AC&DC hybrid generating system based on full power converter

图4所示的交直流混合发电系统仍然采用笼型异步发电机，这种拓扑在多种文献中提到^[21-23]。一方面励磁变换器向发电机提供励磁，同时向负载输出直流电能；另一方面，电抗器L和励磁电容C构成了LC滤波网络将开关频率滤除，输出交流电能。与图3所示的发电拓扑相比，励磁变换器仅提供励磁无功和输出直流有功，因此其容量有所减小；但是，类似地，这种发电方式的交流电压的最大值仍受到直流电压输出的限制；另外，为保证发电机的端电压恒定，发电机仅能运行于恒功率区；为使系统有更好的电磁兼容性和较好的交流输出波形，需要较大的滤波电感，这会增加系统的体积和重量。

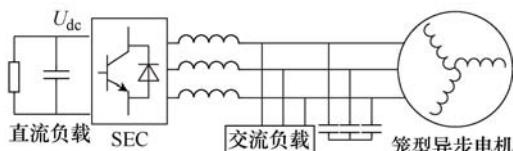


图4 普通笼型异步发电机交直流发电方案

Fig.4 AC&DC hybrid generating system based on typical squirrel cage induction generator

图5所示的是一种新颖的交直流混合发电方式，它由日本学者T. Ahmed等人提出^[24]。它通过整流桥输出直流电能，发电机端电压直接输出交流电能。励磁变换器一方面向发电机提供励磁无功，一方面工作于有源电力滤波（Active Power Filter，

APF）方式，用来消除非线性负载带来的谐波和发电机谐波磁场在端电压上感应出的谐波。这种方式能减小励磁变换器的容量，改善交流输出电压的波形质量，但由于没有对输出的交流电压和直流电压引入直接的电压闭环，可能造成系统的突加、卸负载的动态性能变差，并且可能在宽转速、变负载运行的情况下，产生静差。另外，系统的APF功能需要感值较大的滤波电感，这不利于系统体积和重量的减小。

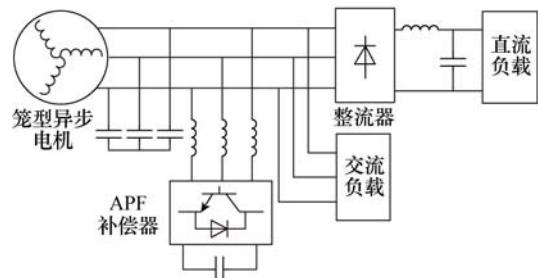


图5 APF模式下的普通笼型异步发电机交直流发电方案

Fig.5 AC&DC hybrid generating system based on squirrel cage induction generator working in the APF mode

1.2 提出的拓扑

本文提出一种新颖的交直流混合输出的发电系统，如图6所示。系统采用DSWIG，该发电机定子上有两套绕组，一套绕组为控制绕组，另一套绕组为功率绕组。发电机所需要的励磁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。励磁变换器通过PWM整流方式向负载提供稳定的HVDC电能；系统的功率绕组输出恒压VSVF交流电能。两套绕组的极对数相同，工作频率相同，共享发电机气隙磁场。DSWIG从发电机本体结构和运行、控制原理上区别于无刷双馈发电机（定子两套绕组工作频率不相等）。相比无刷双馈发电机，它具有更容易的发电机方案设计，更高的运行效率和更简单的控制方法。

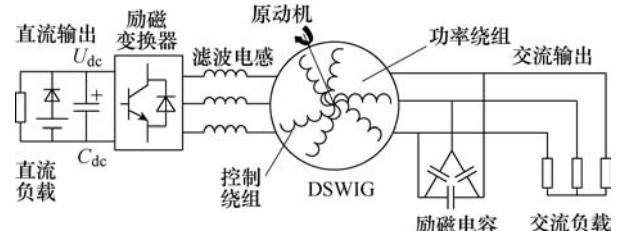


图6 提出的基于 DSWIG 的交直流混合发电系统

Fig.6 Proposed AC&DC hybrid power supply system based on DSWIG

功率侧励磁电容一方面提供系统所需的励磁无功，另一方面可以滤除交流电压的谐波，提高输出

电压的质量；控制侧串联滤波电感，一方面改善发电机电流波形，提高系统的电磁兼容性，另一方面减小变频系统 dv/dt 对发电机绝缘的损坏。这种发电方式有以下几个特点：①两套绕组只有磁的耦合，没有电气的连接，增加了系统的电磁兼容性；②两套绕组匝比配置灵活，因此直流电压和交流电压等级和容量可以灵活搭配；③交流侧有功功率不经过励磁变换器，因此有利于减小功率器件容量；④系统控制绕组侧仅需要较小的滤波电感；⑤交流输出侧利用发电机的漏感作滤波，不需要增加额外的 LC 滤波器。

交流输出电压频率随转速变化，其关系为

$$f = \frac{n_r n_p}{60} + f_{\text{slip}} \quad (1)$$

式中 n_p ——发电机极对数；
 n_r ——发电机转速 (r/min)；
 f_{slip} ——转差频率；
 f ——输出交流电压的频率。

2 系统的建模及控制策略

2.1 系统的建模

DSWIG 的静止坐标系下的等效电路如图 7 所示。忽略激磁回路的铁损电阻。定子侧存在两条支路，两套绕组的互漏感为 L_{lpc} 。

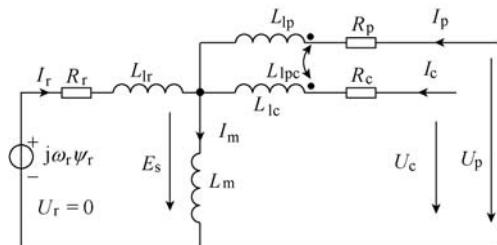


图 7 DSWIG 定子静止坐标下的等效电路

Fig.7 The equivalent circuit of the DSWIG stator at stationary coordinate system

系统的电压方程为

$$\begin{pmatrix} U_p \\ U_c \\ U_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_p & 0 & 0 \\ 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_p \\ I_c \\ I_r \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} \psi_p \\ \psi_c \\ \psi_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -j\omega_r \psi_r \end{pmatrix} \quad (2)$$

磁链方程为

$$\begin{pmatrix} \psi_p \\ \psi_c \\ \psi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_p & L_{lpc} & L_m \\ L_{lpc} & L_c & L_m \\ L_m & L_m & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_p \\ I_c \\ I_r \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} L_p = L_m + L_{lp} \\ L_c = L_m + L_{lc} \\ L_r = L_m + L_{lr} \end{cases} \quad (4)$$

式中 U_p, U_c, U_r ——功率绕组、控制绕组和转子绕组的电压矢量；
 I_p, I_c, I_r ——功率绕组、控制绕组和转子绕组电流矢量；
 ψ_p, ψ_c, ψ_r ——功率绕组、控制绕组和转子绕组的磁链；
 R_p, R_c, R_r ——功率绕组、控制绕组和转子绕组电阻；
 p ——微分算子。

2.2 瞬时转差频率控制策略原理

2.2.1 直流侧电压控制

发电系统的首要任务是要保证输出电压稳定。在不计发电系统损耗的情况下，对于直流侧，输出电压变化的根本原因是系统发出的电磁功率和负载实际需求的电功率不平衡。若发出的电磁功率小于负载所需的电功率，则直流侧输出电压下降；反之则上升。

DSWIG 由转子侧输入机械功率转化的电磁功率为

$$P_e = T_e \omega_r \quad (5)$$

式中 T_e ——电磁转矩；
 ω_r ——发电机转子角速度。

由式 (5) 可知转速 ω_r 的变化和 T_e 都可以造成电磁功率 P_e 的变化。但是，一般认为系统的电气时间常数远小于机械时间常数，即认为电磁转矩 T_e 的突变造成的发电机暂态过程是系统的主要矛盾，而转速变化过程有较大的惯性环节，可以认为在发电机短暂的暂态过程中保持恒定。

若忽略变换器和发电机等损耗，则系统满足功率平衡方程。即

$$P_e = P_{\text{out}} \quad (6)$$

式中 P_{out} ——系统输出的电功率，由直流侧负载功率 P_{outdc} 和交流侧负载功率 P_{outac} 组成，即

$$P_{\text{out}} = P_{\text{outdc}} + P_{\text{outac}} \quad (7)$$

当直流侧负载变化时，若要保持直流母线电压恒定，需要快速的改变发电机的电磁转矩，以满足功率平衡的要求。

稳态时，异步发电机的电磁转矩大小与其转差频率息息相关。DSWIG 本质上属于异步发电机范畴，其基本原理与异步发电机类似，因此有^[25-28]

$$T_e \approx K_m |\psi_s|^2 \frac{\omega_s}{R_r} \quad |\psi_s| = \text{const}, \quad \omega_s \leq \omega_{s\max} \quad (8)$$

式中 K_m ——比例系数；

ψ_s ——定子磁链；

R_r ——折合后的转子电阻。

可见，在不大于最大转差频率的时候，若定子磁链保持恒定，则电磁转矩与转差频率成近似比例关系。因此，可以通过调节转差频率来调节电磁转矩，控制律为

$$\omega_{s1}^* = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_f P_{outdc} \quad (9)$$

式中 V_{dc}^*, V_{dc} ——直流侧母线电压的给定值和反馈值；

ω_{s1}^* ——调节器输出的转差频率。

为了加快系统的响应，增加了直流负载功率前馈项 $k_f P_{outdc}$ 。 k_p 、 k_i 和 k_f 分别为 PI 控制器参数和前馈系数。

2.2.2 交流侧电压控制

一般地，在发电系统中，输出电压保持稳定且系统能够输出额定功率是其重要目标。因而发电系统常常要工作于额定转速以上的恒功率区。此时定子电阻的压降相对反电动势而言比较小，在分析时，可以将其忽略。因此，系统简化的示意图如图 8 所示。图中， V_{sp} 和 V_{sc} 分别为定子磁链在功率绕组和控制绕组上感应的电动势， V_{conv} 为变换器的输出电压， V_{ac} 为交流侧的输出电压， k 为功率绕组和控制绕组的匝比， X_c 为励磁电容的容抗， Z_L 为负载阻抗， X_1 为直流侧滤波电感的电抗。

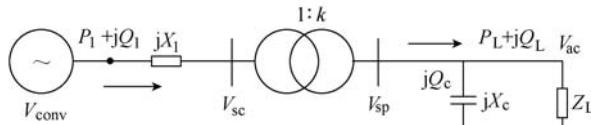


图 8 DSWIG 混合发电系统简化示意图

Fig.8 Simplified structure of DSWIG hybrid power supply system

DSWIG 交直流混合发电系统的无功来源于两个部分。一部分由功率侧励磁电容所提供；另一部分由励磁变换器所提供。

变换器向系统提供的无功功率 Q_1 为

$$Q_1 = \frac{3V_{conv}}{X_1} (V_{conv} - V_{sc} \cos \delta) \quad (10)$$

式中 δ —— V_{conv} 电压矢量超前 V_{sc} 电压矢量的角度。

电容向系统提供的无功功率 Q_c 为

$$Q_c = 3V_{sp}^2 X_c \quad (11)$$

这些无功首先满足 DSWIG 的励磁及滤波电感的需求，其次满足交流侧感性负载无功消耗的需求。在有功功率平衡的前提下，如果系统提供过多的无功，则交流侧电压将会升高，反之则会降低，以满足系统无功的平衡。因此，通过调节系统的无功，就可以调节交流侧的电压。

电容所提供的无功不容易调节，而变换器提供的无功则可以连续调节。由式（10）可知，当变换器的电压 V_{conv} 增加时，系统的无功会增加，则交流侧电压 V_{ac} 会升高；当变换器的电压 V_{conv} 减小时，系统的无功会减小，交流侧电压 V_{ac} 会降低。因此，可以得到交流侧电压的控制律

$$V_{conv}^* = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) (|V_{ac}|^* - |V_{ac}|) \quad (12)$$

与一般交流电力系统类似，为了保持交流侧的电压稳定，一方面需要保持无功功率的平衡，另一方面也要保证有功功率的平衡。为了保障交流侧的有功平衡，将交流侧的有功功率前馈到转差调节输出。即

$$\omega_{s2}^* = k_f P_{outac} \quad (13)$$

功率前馈结合式（9）中的 PI 调节器：前馈作快速调整，PI 调节器作微调。这样可以快速准确地调节系统的有功平衡，满足负载高动态的要求。

2.3 瞬时转差频率控制策略实现

系统的瞬时转差频率控制框图如图 9 所示。直流母线电压的闭环控制是通过调节转差频率实现的，即系统的转差频率 ω_s^* 为

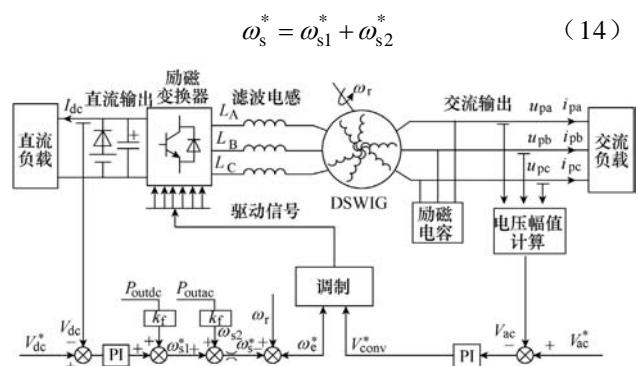


图 9 基于瞬时转差频率控制的系统控制框图

Fig.9 System control block diagram based on instantaneous slip frequency control

为防止发电机进入不稳定区域，对转差频率 ω_s^* 进行限幅，使 $\omega_s^* \leq \omega_{s\max}$ 。当旋转磁场的频率低于转子转速且同向旋转时，异步发电机工作于超同步发电状态。因此变换器的输出频率 ω_e^* 等于转子转速减去转差频率，即

$$\omega_e^* = \omega_r - \omega_s^* \quad (15)$$

P_{outdc} 和 P_{outac} 分别表示直流侧和交流侧实际负载功率。若不计系统损耗，则有

$$P_{outdc} = V_{dc} I_{dc} \quad (16)$$

$$P_{outac} = u_{pa} i_{pa} + u_{pb} i_{pb} + u_{pc} i_{pc} \quad (17)$$

本发电系统运行于额定转速以上的恒功率区。交流侧电压应当稳定在额定电压，此时发电机按照额定的弱磁曲线运行。

3 实验结果

通过实验研究本文提出的交直流混合发电系统的性能。控制框图如图 9 所示。采用的 DSWIG 的额定功率为 18kW；额定转速为 2 700r/min；发电机极对数 $n_p=2$ ；交流额定输出电压 AC 380V，频率范围为 90~270Hz，交流侧功率为 15kW；直流额定输出电压为 DC 400V，直流侧功率为 3kW。恒功率（18kW）运行转速范围为 2 700~8 100r/min（1:3）。功率绕组与控制绕组匝比 $k=2$ ，直流侧滤波电感为 0.5mH。励磁变换器由 Mitsubishi IPM 模块构成，开关频率为 10kHz。处理器采用 Freescale MC56F8346 DSP，系统控制周期为 100μs。实验内容主要包括建压关机实验、稳态性能实验和动态性能实验。

3.1 系统建压和关机实验

图 10 为系统在额定转速为 2 700r/min 时的建压关机实验波形。为使系统建压关机过程电压、电流无冲击，母线电压采用斜坡给定方式，初始状态母线电压为蓄电池电压（24V），控制励磁变换器使得发电机旋转磁场频率逐渐低于转子旋转频率，发电机进入超同步发电状态，直流母线电压开始斜坡上升，直到 400V 最终电压给定。建压过程中，交流输出电压和控制侧绕组电流与直流母线电压同步上升，在约 2s 内系统完成建压。类似地，系统关机过程也采用了斜坡给定方式。由图 10 可见，系统可以可靠完成建压关机任务，且电压、电流均无冲击和超调。

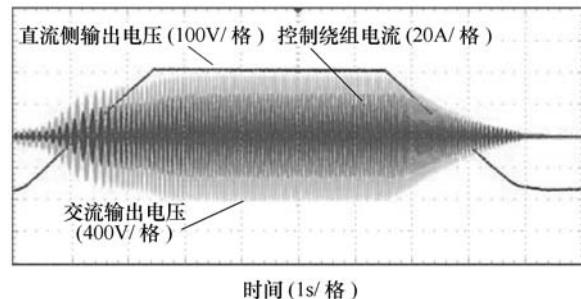
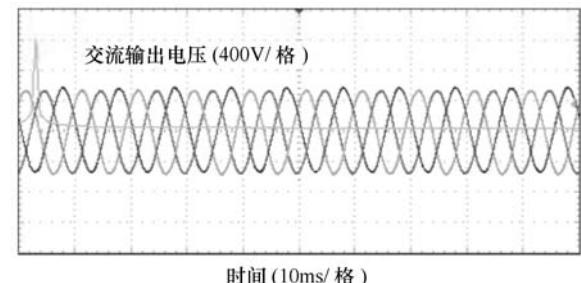


图 10 系统建压关机实验结果

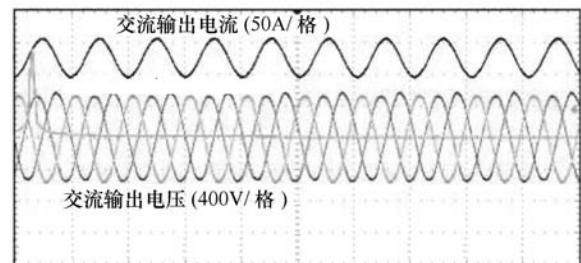
Fig.10 The voltage start-up and close-down experiment results

3.2 稳态特性实验

图 11 和图 12 为发电机分别稳定运行于 3 000r/min 和 7 500r/min 时实验波形。这两种工况分别对应于低速段和高速段。



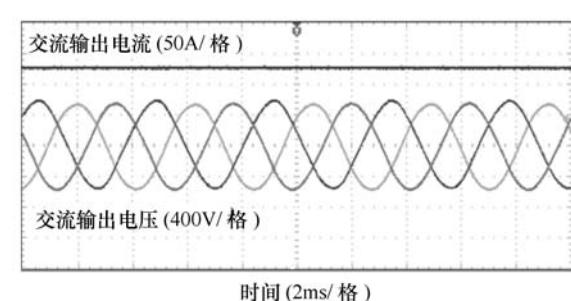
(a) 空载状态



(b) 额定负载状态

图 11 3 000r/min 稳态运行实验波形

Fig.11 Experimental waveforms of steady operation at the speed of 3 000r/min



(a) 空载状态

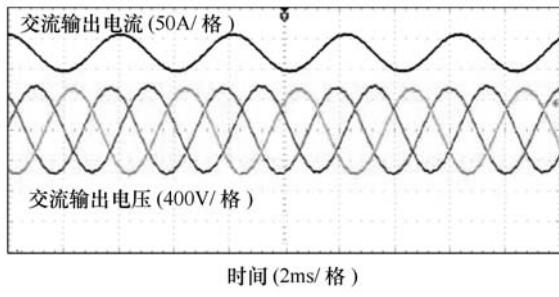


图 12 7 496r/min 稳态运行实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of steady operation at the speed of 7 496r/min

图 11a 为转速 3 000r/min 时空载实验波形, 直流输出电压为 398V, 误差在 0.5% 以内, 三相交流输出线电压有效值约为 383V, 误差在 0.8% 以内。FFT 分析结果表明交流输出电压的 THD 约 1.2%。图 11b 为额定负载 (交流侧 15kW, 直流侧 3kW) 时的实验结果, 直流输出电压为 399V, 直流输出电流约为 7.5A, 交流输出三相线电压幅值和空载一致, 输出线电流幅值约为 33A (有效值约为 23A), 交流输出电压的 THD 约为 1.2%。图 12a 和图 12b 分别为转速 7 496r/min 时空载和额定负载运行实验波形, 实验结果表明在高转速区系统同样具有良好的稳态性能。

3.3 动态特性实验

动态特性实验分为三部分, 分别是交流侧突加突卸 100% 额定负载实验、直流侧突加、突卸 100% 额定负载和变速运行实验。

针对前两部分实验, 本文给出转速在 5 000r/min (中速段) 时交流侧和直流侧突加、突卸额定负载时的实验波形 (事实上, 系统在整个转速区间内都具有类似的动态性能)。图 13a 为直流侧空载, 交流侧突加额定负载 (15kW) 实验波形。突加负载瞬间, 线电流迅速增加到 33A (幅值); 线电压波形未出现较大冲击和畸变, 且能够在 10ms 内恢复至稳态水平。图 13b 为直流侧空载, 交流侧由额定负载运行状态突卸至空载的实验波形, 突卸负载瞬间线电压未出现过大冲击, 且能够在 10ms 内恢复至稳态水平。图 14a 为交流侧空载时, 直流侧突加额定负载 (3kW) 实验波形, 突加负载后, 直流电压最大跌落约 4.5%, 且能够在 20ms 左右恢复; 图 14b 为交流侧空载时, 直流侧由额定负载状态突卸至空载实验波形, 直流电压最大上升约 4.3%, 且能够在 20ms 左右恢复。直流侧突加、突卸额定负载对交流侧电压波形影响并不十分明显。

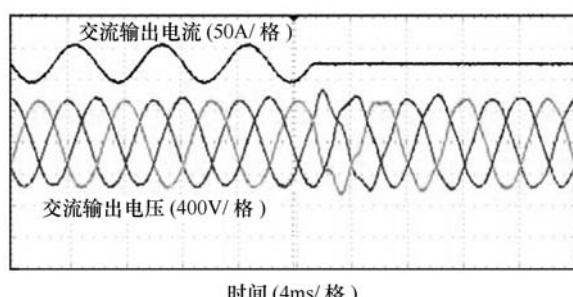
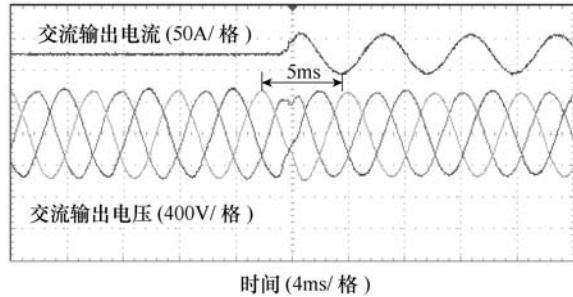


图 13 5 000r/min 时交流侧突加、突卸 100% 额定负载实验结果

Fig.13 Step change of 100% load of the AC output experimental results at the speed of 5 000r/min

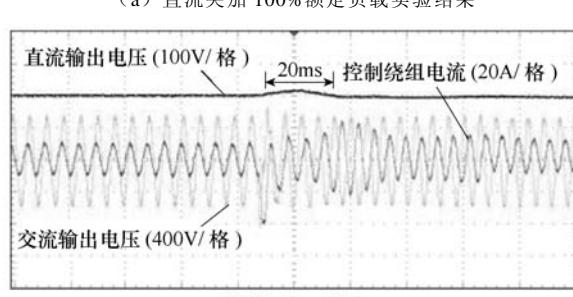
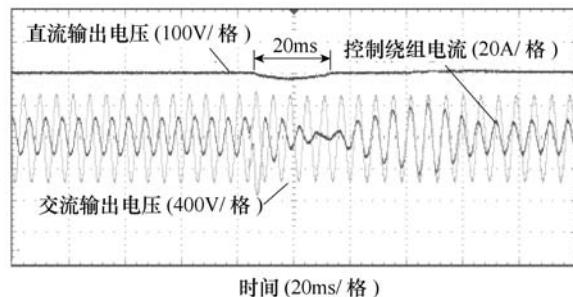


图 14 5 005r/min 时直流侧突加突卸 100% 额定负载实验结果

Fig.14 Step change of 100% load of the DC output experimental results at the speed of 5 005r/min

图 15 为系统在 4 500r/min 满载稳定运行时, 用变频器拖动原动机在 1s 内由 4 500r/min 斜坡升到

5 500r/min 实验波形。可见，发电机转速急剧变化时，交流侧输出电压和直流母线电压均能保持稳定。

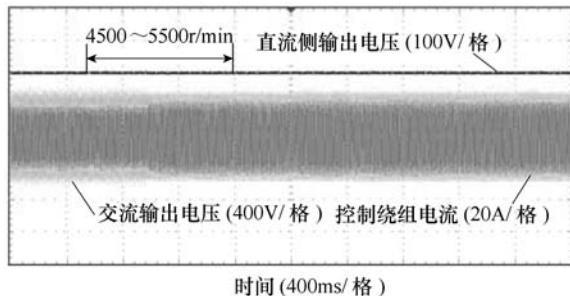


图 15 1s 内转速由 4 500r/min 升到 5 500r/min 时系统运行实验结果

Fig.15 Experimental results of the system with the rotate speed form 4 500r/min to 5 500r/min in one second

3.4 系统总体性能指标

考察整个转速区间和负载区间，得到性能指标数据见表 1。

表 1 系统主要性能指标

Tab.1 The main performance index of the system

参数	数 值
恒功率运行转速范围/(r/min)	2 700~8 100
额定直流侧输出电压/V	400
额定交流侧输出电压/V	380V
变频范围/Hz	90~270
直流侧功率/kW	3
交流侧功率/kW	15
交流电压 THD(%)	<2
交流电压稳态调整率(%)	± 0.79
交流电压波形系数	1.41 ± 0.10
直流电压纹波/V	$< \pm 2$
稳态直流电压变化范围/V	$< \pm 3$
直流电压跌落(上升)(%)	5(5)
突加(卸) 直流电压恢复时间/ms	<25(25)
额定负载 交流电压跌落(上升)(%)	5.3(4.7)
交流电压恢复时间/ms	<8(9)
发电机效率(%)	>89.1

4 结论

本文提出了基于 DSWIG 的交直流混合发电系统，设计了该发电系统的控制策略，通过实验证明了这种发电拓扑结构的可行性。

实验证明，该发电系统能够在 1:3 的宽转速范围内稳定恒功率运行；且具有优秀的动、静态性能。

突加、突卸 100% 额定负载时，直流电压瞬态调整率小于 5%，动态恢复时间小于 25ms，交流电压瞬态调整率小于 7%，动态恢复时间小于 10ms。本文的研究表明，该发电系统可以应用于航空、舰载和车辆等对电源品质要求较高的独立电源场合。

参考文献

- [1] Emadi E, Ehsani M. Aircraft power system: technology, state of the art and future trends[J]. IEEE Aerospace and Electronics System Magazine, 2000(1): 28-32.
- [2] Rosero J A, Ortega J A, Aldabas E, et al. Moving towards a more electric aircraft[J]. IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine, 2007, 22(3): 3-9.
- [3] Taha M H, Skinner D, Gami S, et al. Variable frequency to constant frequency converter (VFCFC) for aircraft applications[J]. International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2002: 235-240.
- [4] AbdElhafez A A, Forsyth A J. A review of more-electric aircraft[C]//13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, 2009, 5: 26-28.
- [5] 严东超. 飞机供电系统[M]. 北京：国防工业出版社，2010.
- [6] Izquierdo D, Azcona R, Lopez del Cerro F J, et al. Electrical power distribution system (HV270DC) for application in more electric aircraft[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010: 1300-1305.
- [7] Maldonado M A, Shah N M, Cheek K J, et al. Power management and distribution system for a more-electric aircraft (MADMEL)-program status[C]//Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1997: 274-279.
- [8] Olaiya M, Buchan N. High power variable frequency generator for large civil aircraft[J]. IEE Colloquium on Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft, 1999: 3/1- 3/4.
- [9] Rosado S, Ma Xiangfei, Francis G, et al. Model-based digital generator control unit for a variable frequency synchronous generator with brushless exciter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 42-52.
- [10] Chang Jie, Wang Anhua. New VF power system archi-

- ture and evaluation for future aircraft[J]. IEEE Transactions on Aerospace And Electronic Systems, 2006, 42(2): 527-539.
- [11] Niggemann R E, Peecher S, Rozman G. 270-VDC/hybrid 115V AC electric power generating system technology demonstrator[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1991, (8): 21-26.
- [12] 马伟明. 电力集成技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 16-20.
Ma Weiming. Power system integration technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 16-20.
- [13] 马伟明. 交直流电力集成技术[J]. 中国工程科学, 2002, 4(12): 53-59.
Ma Weiming. AC-DC power integration technique[J]. Engineering Science, 2002, 4(12): 53-59.
- [14] Kumsuwan Y, Srirattanawichaikul W, Premrudeepreechacharn S. A simple voltage and frequency control of VSI-inverter-fed self-excited induction generator drive[C]//ICROS-SICE International Joint Conference, 2009: 430-434.
- [15] Bansal R C. Three-phase self-excited induction generators: an overview[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 292-299.
- [16] 胡育文, 黄文新, 张兰红. 异步电机起动/发电系统的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 7-13.
Hu Yuwen, Huang Wenxin, Zhang Lanhong. Research on employing starter/generator system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 7-13.
- [17] Elbuluk M E, Kankan M D. Potential starter/generator technologies for future aerospace applications [J]. IEEE AES Systems, 1997, 21(5): 24-31.
- [18] Alan I, Lipo T A. Starter/generator employing resonant converter-fed induction machine part I: analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4): 1309-1318.
- [19] Alan I, Lipo T A. Starter/generator employing resonant converter fed induction machine part II: Hardware prototype[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4): 1319-1329.
- [20] Aircraft Electric Power Characteristics[S]. Military Standard, MILSTD-704F, 2004.
- [21] 刘陵顺, 胡育文, 黄文新. 电力电子变换器控制的异步电机发电技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 1-7.
Liu Lingshun, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Summary of technology of induction generators with power electronic converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 1-7.
- [22] Leidhoid R, Garcia G, Valla M I. Induction generator controller based on the instantaneous reactive power theory[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3): 368-372.
- [23] Ahmed T, Nishida K, Nakaoka M. Advanced control of PWM converter with variable-speed induction generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(4): 934-945.
- [24] Ahmed T, Nishida K, Nakaoka M. A novel stand-alone induction generator system for AC and DC power applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6): 1465-1474.
- [25] 陈伯时. 电力拖动控制系统—运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [26] Garcia A Munoz, Lipo T A, Novotny D W. A new induction motor V/f control method capable of high-performance regulation at low speeds[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(4): 813-821.
- [27] Miles A R, Novotny D W. Transfer functions of the slip-controlled induction machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1979, IA-15(1): 54-62.
- [28] 刘迪吉. 航空电机学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.

作者简介

- 史经奎 男, 1987 年生, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动。
E-mail: sjk909@126.com (通信作者)
- 黄文新 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制。
E-mail: huangwx@nuaa.edu.cn