

一种适用于 FADEC 系统的宽输入范围 AC/DC 变换器

蒋文亮^{1,2}, 朱银玉², 金招省², 黄金泉^{1,3}

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 中国航空工业集团公司 航空动力控制系统研究所, 江苏 无锡 214063;
3. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 针对航空发动机全权限数字电子控制(FADEC)系统专用发电机的输出特性,提出一种电流回馈型恒流变频 AC/DC(交流/直流)变换技术,以适应专用发电机的宽输出范围,满足 FADEC 系统的供电需求. 给出了该技术的控制策略、拓扑结构、工作原理、过压故障检测及保护设计方法. 试验结果表明:该变换器工作稳定,在 $-55\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全温范围内,满足国家军用标准飞机供电特性(GJB181A)对电源的相关规定. 研究成果已成功应用于某型航空发动机数字控制系统中,并通过了台架试车和飞行平台试验.

关 键 词: 全权限数字电子控制系统; 恒流变换技术; 航空发动机; 宽输入范围交流/直流变换器; 过压保护与故障隔离

中图分类号: V231

文献标志码: A

A wide-range-input AC/DC converter for FADEC system application

JIANG Wen-liang^{1,2}, ZHU Yin-yu², JIN Zhao-sheng², HUANG Jin-quan^{1,3}

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Aviation Motor Control System Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214063, China;
3. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: According to the output characteristics of the special generator for full authority digital electronic control (FADEC) system of aero-engine, a constant current variable frequency control AC/DC (alternating current/direct current) transform technique based on current feedback was proposed with purpose of accommodating to the wide-range-output of the special generator, so as to meet the power supply requirements of FADEC system. The control strategy, topological structure and operation principles were embodied along with the overvoltage test and protection design. Experiments results prove the reliability of the converter in full temperature range from $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, and compliance with the stipulations of national military standard GJB181A covering aircraft electric power characteristics. Research findings has been successfully applied in certain aero-engine numerical control system and validated in both bench test and flight platform experiment.

收稿日期:2014-04-25

作者简介:蒋文亮(1974—)男,江西樟树人,研究员,博士生,主要从事航空宇航推进理论与工程的研究.

通讯作者:黄金泉(1963—)男,江苏泰兴人,教授,博士,主要从事航空发动机建模、控制与故障诊断研究.

Key words: FADEC system; constant current transform technique; aero-engine; wide-range-input AC/DC converter; overvoltage protection and failure isolation

美国联邦航空局(FAA)在新制定的相关规定中要求全权限数字电子控制(FADEC)系统必须拥有自己专用的电源以实现供电自给. 永磁同步三相交流发电机具有体积小、可靠性高、寿命长等优点^[1-5], 因此成为 FADEC 系统优选的专用电源. 但专用发电机的输出电压和频率会随着航空发动机转速变化而在较宽范围内变化, 航空发动机从最低风车状态(相对物理转速 12%)到最大状态(相对物理转速 106%), 转速变化 8~9 倍, 专用发电机的电压和频率也会随之产生相应的变化范围. 因此, 有必要研究适用于输入源电压和频率宽范围变化的 AC/DC 变换技术. 且变换后的电源必须符合国家军用标准飞机供电特性(GJB181A)对电源的相关规定, 以满足 FADEC 系统的供电需求.

传统的二极管整流加宽输入电压 DC/DC 变换的两级式结构比较通用. 由 buck 和 boost 变换器级联构成的 H 桥三端口变换器^[6-15]能够适应一定宽电压变化范围的应用场合, 并已广泛应用于独立光伏发电系统^[16]和混合动力汽车^[17]等系统之中. 但该类变换器技术上很难满足 FADEC 系统的需求, 只能通过改变拓扑结构或增加级联的数量来解决. 但这会带来开关器件数量多、面积大和效率低等问题, 不适用于对体积和可靠性要求较高的 FADEC 系统.

本文针对 FADEC 系统专用永磁同步三相交流发电机(下文简称专用发电机)恒流输出的特性, 提出一种适用于 FADEC 系统的宽输入范围 AC/DC 变换技术, 该变换技术已成功应用于某型航空发动机数字控制系统中, 并随航空发动机进行试验验证.

1 控制策略

专用发电机的转速与输出电压和功率呈线性关系, 转速越低, 其供电能力越差. 风车状态是专用发电机最恶劣的供电状态. 通过优化专用发电机的各项参数, 能够满足航空发动机处于风车状态时系统的最低功率要求. 但在航空发动机风车和以上状态时, 专用发电机会输送超出规定要求的电压和功率. 一般情况下, 航空发动机从风车启动到最大状态, 其转速比约为 1 : 9. 根据专用发

电机特性, 其转速与输出三相交流电的频率之间存在比例关系, 表达式为

$$n_r = k_1 f \quad (1)$$

式中 n_r 为专用发电机的转速; f 为三相交流电的频率; k_1 为比例系数.

在风车转速以上状态, 某型 FADEC 系统专用发电机的线电压 U_1 与转速 n_r 基本成线性关系, 如图 1 所示. 表达式为

$$U_1 = k_2 \cdot n_r \quad (2)$$

式中 k_2 为比例系数.

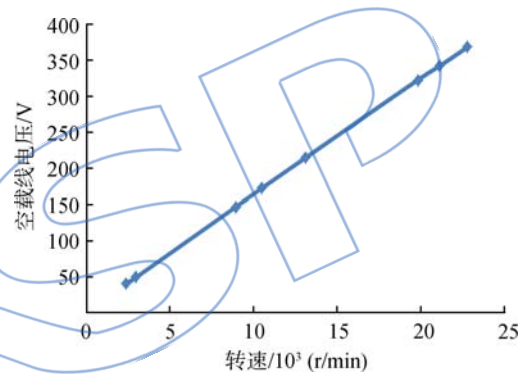


图 1 FADEC 系统专用发电机测试数据

Fig. 1 Testing data of special generator for FADEC system

专用发电机的理想模型可以用一个正弦电压源和发电机内部的等效阻抗来描述, 如图 2 所示. 其中等效阻抗 Z_1 的表达式为

$$Z_1 = j\omega L_1 + R_1 \quad (3)$$

式中 L_1 为等效电感; R_1 为等效直流电阻; ω 为角频率.

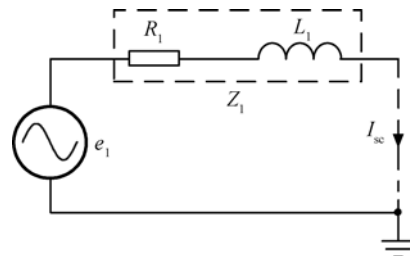


图 2 FADEC 系统专用发电机等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of special generator for FADEC system

当专用发电机输出短路时, 短路电流 I_{sc} 的最大值表达式如下:

$$I_{sc, \max} = \left| \frac{e_1}{j\omega L_1 + R_1} \right| = \frac{U_1}{\sqrt{3}(\omega^2 L_1^2 + R_1^2)} \quad (4)$$

式中 e_1 为相电枢绕组的感应电势, 转速较高时, 等效直流电阻 R_1 远小于等效电感 L_1 的感抗, 则短路电流最大值的表达式可以简化为

$$I_{sc, \max} = \frac{U_1}{\sqrt{3}\omega L} \quad (5)$$

将式(1)、式(2)代入式(5)中, 得出

$$I_{sc, \max} = \frac{k_2 n_r}{2\sqrt{3}\pi f L_1} = \frac{k_2 k_1 f}{2\sqrt{3}\pi f L_1} = \frac{k_1 k_2}{2\sqrt{3}\pi L_1} \quad (6)$$

由式(6)可知 $I_{sc, \max}$ 为定值, FADEC 系统专用发电机可近似为恒定电流发电设备, 能长期工作在短路条件, 其电流输出特性如图3所示。

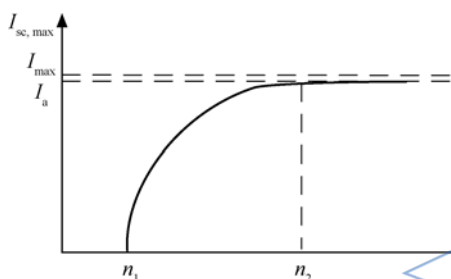


图3 专用发电机的电流输出特性曲线

Fig. 3 Current output characteristic curve of special generator

当专用发电机从起动转速 n_1 进入风车转速 n_2 后, 发电机的输出电流的最大值不随着转速的增加而变大, 基本恒定在额定电流 I_a , 最大不超过最大电流 $I_{\max}$, 额定电流 I_a 与最大电流 $I_{\max}$ 的关系如下:

$$I_a \approx 0.9 I_{\max} \quad (7)$$

当专用发电机稳定在一定转速时, 视在功率不变. 本文充分利用 FADEC 系统专用发电机输出电流幅值恒定的特性, 提出一种能量回馈型控制方式, 根据有功功率需求, 通过控制专用发电机相间短路时间, 使输出的多余功率通过等效阻抗返回到专用发电机内部, 以达到稳定输出电压的目的. 主电路拓扑结构示意图如图4所示. 图中 Q_1, Q_2, Q_3 为控制相间短路的功率管; e_a, e_b, e_c 为三相电枢绕组的感应电势; R_a, R_b, R_c 为专用发电机的直流等效电阻; L_a, L_b, L_c 为专用发电机的等效电感; $D_1 \sim D_6$ 为肖特基整流管; C_1 为滤波电容; U_{dc} 为直流侧输出电压平均值. 这种整流拓扑结构简单可靠, 只需在传统二极管整流电路的下桥臂并联连接功率管, 通过控制功率管的导通时

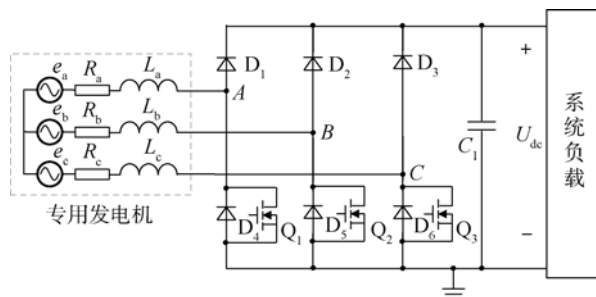


图4 主电路拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of main circuit

间即可达到整流和稳压两个目的. 因功率管的体内二极管导通压降较大, 温升较高, 不能直接代替下桥臂的肖特基整流管 $D_4 \sim D_6$.

2 工作原理

2.1 工作模式

专用发电机转速低于风车转速时, 输出功率低于需求的有功功率, AC/DC 变换器工作在传统二极管整流模式. 转速升高后, 变换器工作在稳压模式, 在一个开关周期内共有两种可能的工作模式. 图5为变换器的主要工作波形. 图6分别为两种工作模式下的等效电路. 图中 i_a, i_b, i_c 为专用发电机三相输出电流; U_{gs} 为功率管 $Q_1 \sim Q_3$ 的驱动电压; u_A, u_B, u_C 分别为三相桥臂中心点的电压.

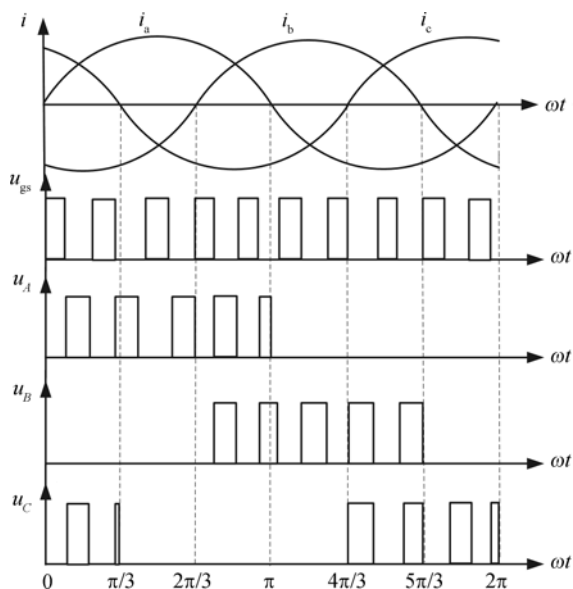


图5 AC/DC 变换器主要工作波形

Fig. 5 Main waveforms of AC/DC converter

2.1.1 模式1(整流工作模式)

如图6(a)所示, 当开关管截止时, 专用发电机的三相绕组接入整流电路, 向 FADEC 系统负

载提供能量,并给 AC/DC 变换器直流侧的储能电容 C_1 充电. 三相电流 i_a, i_b, i_c , 储能电容电流 i_{C_1} 以及负载电流 i_l 满足

$$\begin{cases} -i_b = i_{C_1} + i_l & 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} \\ i_a = i_{C_1} + i_l & \frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3} \\ -i_c = i_{C_1} + i_l & \frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (8)$$

$$i_{C_1} = C_1 \frac{du_{dc}}{dt} \quad (9)$$

式中 u_{dc} 为直流侧输出电压瞬态值.

2.1.2 模式 2(能量回馈工作模式)

如图 6(b) 所示, 三相绕组相间短路时, 发电机输出的恒定电流在三相电枢绕组之间流动, 因 FADEC 系统专用发电机等效直流电阻远小于等效电感的感抗, 这部分电流将转换为无功功率, 此时负载的能量由直流侧的储能电容提供, 满足

$$C_1 \frac{du_{dc}}{dt} + i_l = 0 \quad (10)$$

由工作模式分析可知, 在传统二极管整流工作模式中, 间隙插入短路工作模式, 通过控制变换器短路工作模式的时间, 实现交流稳压变换.

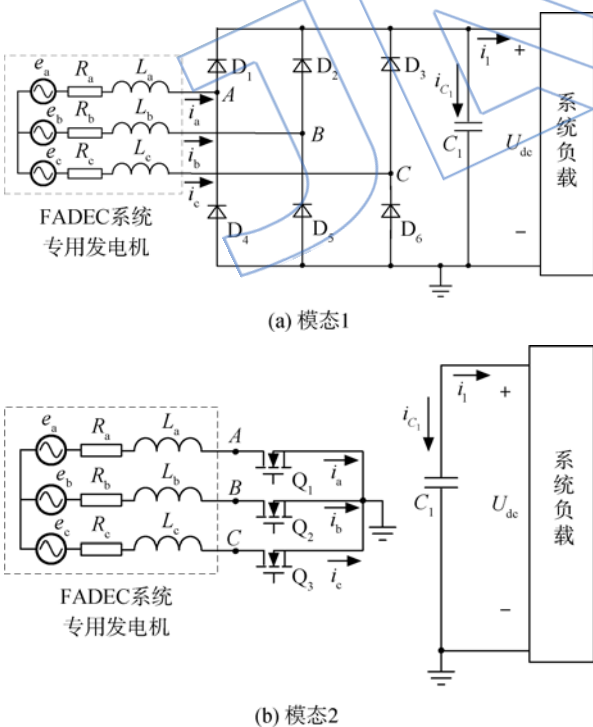


图 6 不同工作模式等效电路

Fig. 6 Equivalent circuits of different modes

2.2 双环控制结构

FADEC 系统在进行双通道主备轮转或控制

大电流电磁阀输出时会出现突然加载或者抛载现象, 这对 AC/DC 变换器的动态特性提出较高的要求. 因此, 如 PI(proportion integration, 比例积分)控制框图(图 7)所示, 本文采用双环控制结构, 以提高系统的动态性能.

直流侧输出电压 U_{dc} 低于给定电压 V_{ref} , 整流电路下桥臂的 MOS 管截止, AC/DC 变换器工作在三相全桥整流状态; 反之, MOS(metal-oxide-semiconductor)管导通, 专用发电机相间短路, AC/DC 变换器工作在能量回馈模式. 由此可见, 与传统的输出电压降低对应占空比增大不同, 此处的控制方式与之相反, 输出电压降低对应占空比减小. 因此, 在传统双环控制结构的基础上, 需要将驱动芯片前端的 PWM(pulse width modulation)信号反相, 如图 7 所示.

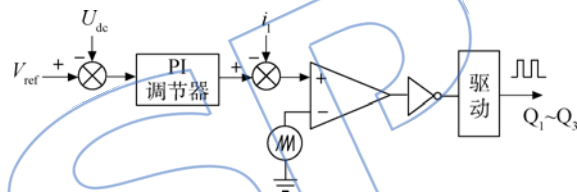


图 7 PI 控制框图

Fig. 7 Block diagram of the control system designed by PI

3 过压保护与故障隔离

应用于 FADEC 系统的电源, 其安全性至关重要^[18]. 因 AC/DC 变换器过压故障会损坏后级电路, 直接影响 FADEC 系统的稳定工作, 甚至会影响整个飞机的安全. 同时 GJB181A 对直流电源的过压极限有明确规定, 因此, 过压保护与故障隔离措施必不可少.

因专用发电机输出电压较高, 当控制回路出现异常或整流电路下桥臂的 MOS 管开路时, 过压故障的发生在所难免. 因此, 针对此故障, 本系统采用了两级保护模式: 第 1 级保护通过控制占空比信号使得变换器一直处于工作模式 2; 第 2 级保护在 AC/DC 变换器和负载之间, 增加了独立于控制回路且自备辅助电源的过压保护模块, 如图 8 所示. 图中 Q_4 为起过压保护作用的功率管, K_1 为隔离故障的继电器, 二极管 D_8 和 D_9 将飞机电源和 AC/DC 变换器输出电源通过高选后给辅助电源供电, 这种方式能够确保故障模式下, 过压保护模块的正常工作, 避免共模故障的出现.

当 U_{dc} 出现过压故障时, 为防止虚假信号, 保

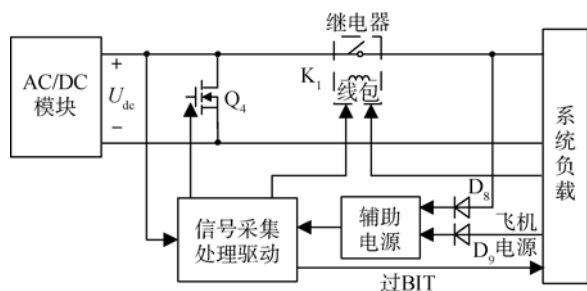


图8 过压保护模块

Fig. 8 Protection module of overvoltage

护模块在确认 1 ms 后,输出控制信号给功率管 Q_4 ,并使之导通.图 4 中,AC/DC 变换器输出侧储能电容 C_1 的能量迅速从 Q_4 流走,直至 U_{dc} 下降为零,同时继电器 K_1 断开以隔离专用发电机电源.FADEC 系统采集过压故障信号,并给出故障对策,以提高系统的安全性.

继电器 K_1 同时受到 FADEC 系统控制,隔离后级电路与故障状态的专用发电机电源,确认故障消失后 FADEC 系统重新开启 K_1 .如果连续出现几次故障,系统会禁止开启继电器 K_1 并将其锁存,直至系统复位.

4 试验验证

精确建立专用发电机与 FADEC 系统负载模型比较困难,本文采用电路仿真的方法来初定电压环与电流环的 PI 控制参数,并在实际专用发电机上进行试验验证和优化.

图 9 为某型 FADEC 系统发电机试验验证示意图,专用发电机空载输出电压为 40~342 V (12%转速以上),频率为 320~2 840 Hz,短路电流约为 12.5 A.AC/DC 变换器输出电压为 29 V,满载输出最大电流为 10 A,试验要求在航空发动机转速 12% (即风车转速) 以上,AC/DC 变换器能实现满负载工作.

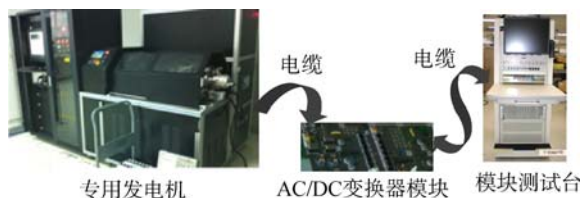


图9 专用发电机试验连接图

Fig. 9 Connection graph of special generator experiments

在专用发电机不同转速下,AC/DC 变换器满负载工作稳定.在最恶劣情况下,即风车起动时刻变换器输出电压纹波小于 1 V,满足 GJB181A 对

低压直流电源脉动幅度 (低于 1.5 V) 的规定, U_{dc} 和 U_{gs} 电压波形如图 10 所示.

在 106% 相对物理转速下专用发电机的转速和输出电压最高,此时进行负载由满载到空载的抛载试验和空载到满载的加载试验,试验波形分别如图 11、图 12 所示.如图所示,AC/DC 变换器

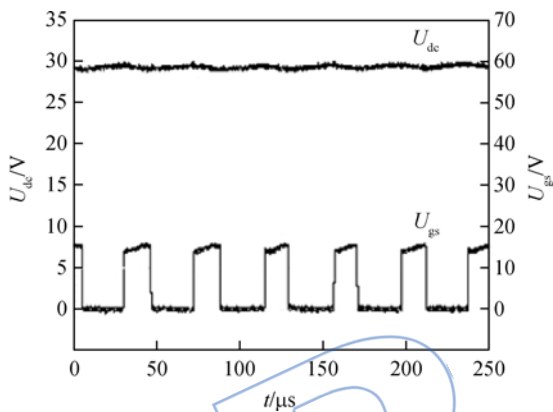


图10 满载试验波形

Fig. 10 Experimental waveforms in full load condition

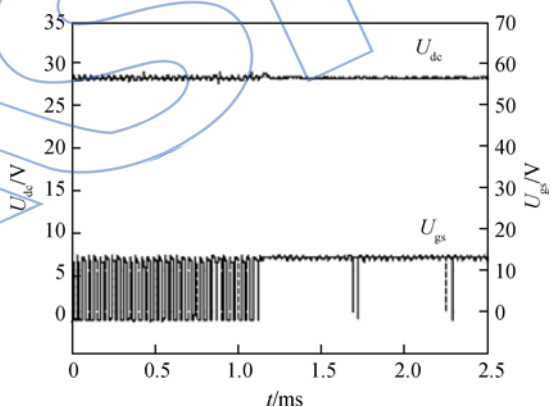


图11 突卸负载试验波形 (满载到空载)

Fig. 11 Experimental waveforms of sudden decrease load (full-load to non-load)

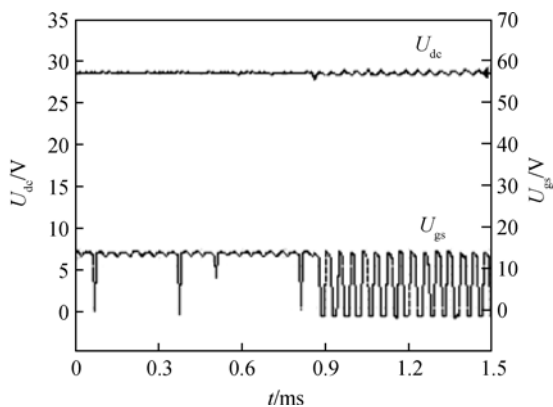


图12 突加负载试验波形 (空载到满载)

Fig. 12 Experimental waveforms of sudden increase load (non-load to full-load)

具有良好的动态特性,负载调整率低于 2 V,恢复时间小于 100 μ s.

同时,过压故障注入试验结果显示,AC/DC 变换器能有效隔离过压故障.该变换器已成功应用于某型 FADEC 系统中,并通过高低温($-55 \sim 125^{\circ}\text{C}$)、振动等环境试验,以及 FADEC 系统的半物理、台架试车和飞行平台试验的使用确认,AC/DC 变换器性能稳定,工作可靠,满足 GJB181A 对电源的相关规定.

5 结 论

针对国内航空发动机控制领域首次采用的宽频宽电压输出的专用发电机作为 FADEC 系统主电源的供电方式,本文充分利用专用发电机输出可以短路工作的特性,提出一种能量回馈型控制方法,有效解决宽输入范围 AC/DC 变换的难题.变换器结构简单,可靠性高,独立的过压保护和隔离措施,有效保证了 FADEC 系统的安全,并随 FADEC 系统通过了 2000 多小时的可靠性试验,为 FADEC 系统专用电源变换技术的发展奠定了基础.

参考文献:

- [1] 王江,李韬,曾启明,等.基于观测器的永磁同步电动机微分代数非线性控制[J].中国电机工程学报,2005,25(2):87-92.
WANG Jiang, LI Tao, Tsang K M, et al. Differential algebraic observer based nonlinear control of permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 87-92. (in Chinese)
- [2] 沈建新,缪冬敏.变速永磁同步发电机系统及控制策略[J].电工技术学报,2013,28(3):1-8.
SHEN Jianxin, MIAO Dongmin. Variable speed permanent magnet synchronous generator systems and control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 1-8. (in Chinese)
- [3] Haque M E, Negnevitsky M, Muttaqi K M. A novel control strategy for a variable-speed wind turbine with a permanent-magnet synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(1): 331-339.
- [4] WANG Haoxiong, MA Weiming, XIAO Fei, et al. Control strategy of permanent magnet synchronous generator of directly driven wind turbine[C]//Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Chengdu: IEEE, 2009: 320-323.
- [5] 唐任远.现代永磁电机与设计[M].1版.北京:机械工业出版社,2006.
- [6] ZHAO Chuanhong, Round S D, Johann W. An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2443-2453.
- [7] Al Atrash H, Tian F, Batarseh I. Tri-modal half-bridge converter topology for three-port interface[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 341-345.
- [8] TAO Haimin, Duarte J L, Marcel A M. Three-port triple-half-bridge bidirectional converter with zero-voltage switching[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 782-792.
- [9] QIAN Zhijun, Rahman B A. Modeling and control of three-port DC-DC converter interface for satellite applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(3): 637-645.
- [10] 任小永,唐钊,阮新波,等.一种新颖的四开关 Buck-Boost 变换器[J].中国电机工程学报,2008,28(21):15-19.
RRN Xiaoyong, TANG Zhao, RUAN Xinbo, et al. A novel four switch Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 15-19. (in Chinese)
- [11] 阮新波,李斌.零电压零电流开关 PWM 复合式全桥三电平变换器[J].中国电机工程学报,2003,23(4):9-14.
RUAN Xinbo, LI Bin. Zero-voltage and zero-current-switching PWM hybrid full-bridge three-level converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 9-14. (in Chinese)
- [12] Ruan X, Chen Z, Chen W. Zero-voltage-switching PWM hybrid full-bridge three-level converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(2): 395-404.
- [13] Chen J, Maksimovic D, Erickson R. Analysis and design of a low-stress buck-boost converter in universal-input PFC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(2): 320-329.
- [14] 张国驹,唐西胜,周龙,等.基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J].中国电机工程学报,2011,31(6):15-21.
ZHANG Guojun, TANG Xisheng, ZHOU Long, et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in super capacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21. (in Chinese)
- [15] 肖华锋,谢少军.用于光伏并网的交错型双管 Buck-Boost 变换器[J].中国电机工程学报,2010,30(21):7-12.
XIAO Huafeng, XIE Shaojun. An interleaving double-switch Buck-Boost converter for PV grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 7-12. (in Chinese)
- [16] Haribaran K, Mohan N. Three-port series-resonant DC-DC converter to interface renewable energy sources with bidirectional load and energy storage ports[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(10): 2289-2297.
- [17] SU Guijia, TANG Lixin. A multiphase, modular, bidirectional, triple-voltage DC-DC converter for hybrid and fuel cell vehicle power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 3035-3046.
- [18] 姚华,王国祥.航空发动机全权限数控系统研究和试飞验证[J].航空动力学报,2004,19(2):247-253.
YAO Hua, WANG Guoxiang. A study and flight evaluation of full authority digital engine control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(2): 247-253. (in Chinese)