

柴油发电机数字电压调节技术研究

吕沁, 付大丰, 杨善水, 祁在明, 王立坤

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 发电机调压器是维持柴油机组正常运行不可缺少的重要部分, 对机组的安全稳定运行起到重要作用; 目前, 主要存在基于晶体管式的模拟调压器以及基于微处理器的数字调压器两种; 鉴于数字调压器具有传统的模拟式调压器无法比拟的优势, 文章针对某型车辆柴油发电机设计了基于 TMS320F28335 芯片的数字电压调节器; 设计了数字电压调节器的输入输出接口电路, 包括模拟量调理电路、数字量调理电路、励磁主电路和励磁驱动电路等, 制作功率板; 采用以 TMS320F28335 为核心的 DSP 最小系统作为核心控制器, 利用电压、励磁电流双环调节的方式, 采用复合 PID 控制算法; 搭建系统实验平台, 对调压器进行测试, 满足预期功能要求。

关键词: 柴油机组; 模拟调压器; 数字调压器; TMS320F28335

Research on Digital Voltage Regulation Technology of Diesel Generator

Lv Qin, Fu Dafeng, Yang Shanshui, Qi Zaiming, Wang Likun

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The generator voltage regulator is an indispensable part of maintaining the normal operation of the diesel unit, and it plays an important role in the safe and stable operation of the unit. At present, there are mainly two types of transistor-based analog voltage regulators and microprocessor-based digital voltage regulators. In view of the advantages that the digital voltage regulator has unmatched by the traditional analog voltage regulator, this paper designs a digital voltage regulator based on the TMS320F28335 chip for a certain type of vehicle diesel generator. The input and output interface circuit of the digital voltage regulator is designed, including the analog conditioning circuit, the digital conditioning circuit, the excitation main circuit and the excitation driving circuit, etc., to fabricate the power board. The DSP minimum system with TMS320F28335 as the core is adopted as the core controller, and the composite PID control algorithm is adopted by means of voltage and excitation current double loop adjustment. Set up a system experiment platform to test the regulator to meet the expected functional requirements.

Keywords: diesel generator unit; analog voltage regulator; digital voltage regulator; TMS320F28335

0 引言

电压调节器是柴油发电机组运行中不可忽视的重要环节。它的性能直接关系到电源系统的运行是否安全稳定, 它影响到交流发电机输出电压的稳态精度、动态特性等^[1]。随着电压调节技术的发展, 它在实现自身稳态调压精度的同时, 往往还具有一些重要的保护功能^[2]: 限制发电机的负载电流、软起动功能、励磁电流限制。为此, 有必要对柴油发电机组的电压调节器进行研究。

目前发电机采用的调压器大多还是模拟式的。文献 [2] 针对 45 KVA 的交流发电机, 采用有效值检测的方式, 设计了模拟式调压器, 但是由于电压单环调制的原因, 动态性能较差。文献 [3] 针对汽车高压无刷直流发电机, 设计了 PWM 电流型控制调压方法, 可以解决高压直流发电机电压精度过低的问题。文献 [4] 和 [5] 对无刷型发电机的数字电压调节技术开展了研究, 可以满足调压器的稳

态性能与暂态性能的要求。文献 [6] 针对混合励磁同步发电机的数字调压技术进行研究。文献 [7] 采用模糊滤波算法和场电流限制法设计了数字调压器, 验证了调压器在变速恒频电源系统中的可行性。文献 [8] 利用 FPGA 实现对电源输出的调节和控制。与模拟式电压调节器相比, 数字电压调节器具有抗干扰性强、控制策略灵活、控制参数调整简便、数据可记载等优点。同时, 随着柴油发电机组技术的不断发展, 新技术和新成果不断地被采纳应用, 柴油发电机组的数字化发展还需要进一步研究。

本文针对某型车辆柴油发电机设计了基于 TMS320F28335 芯片的数字调压器。在 Altium Designer 环境下, 设计了数字电压调节器的输入输出接口电路, 包括模拟量调理电路、数字量调理电路、励磁主电路和励磁驱动电路等, 制作功率板。采用以 TMS320F28335 为核心的 DSP 最小系统, 利用电压、励磁电流双环调节的方式, 设计软件控制算法。搭建系统实验平台, 对调压器进行测试, 满足预期功能要求。

1 调压器功能

本文设计的数字调压器的调节对象为某型车辆柴油发电机 (10~30 kW), 发电机输出电压为 220 V/50 Hz。

收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-08-05。

作者简介: 吕沁 (1995-), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事航空配电系统方向的研究。

杨善水 (1969-), 男, 安徽望江人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事航空航天供电系统方向的研究。

数字调压器的主要功能是, 通过闭环控制稳定发电机的输出电压, 通过上位机监测输出电压、负载电流、功率、功率因数、励磁电压、励磁电流、发电机定子温度、频率。此外, 还需要对发电机过压、励磁过压、励磁过流、绕组温度过高等故障进行可靠保护。通过在硬件电路板上加入 LED 指示灯实现光报警, 由检测控制电路实现保护工作, 并在上位机的软件面板上显示报警信息。

2 调压器结构及工作原理

发电机组的数字控制系统图如图 1 所示。输入输出接口电路采样发电机的输出电压、负载电流、励磁电压、励磁电流、定子温度等信号, 由 DSP 电路作闭环控制进行调压。发电机的电压经变换之后, 给调压器供电。调压器通过调节励磁来实现调压的功能。

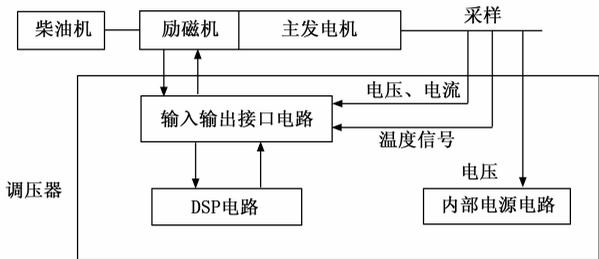


图 1 柴油发电机组的控制系统图

数字调压器的结构如图 2 所示。主要包括以下几部分:

- 1) TMS320F28335 最小系统; 2) 模拟量检测、调理电路;
- 3) 数字输入、输出接口; 4) 功率放大及励磁主电路。

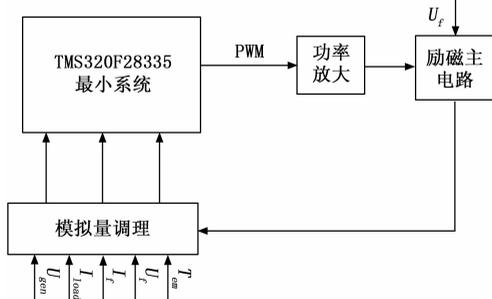


图 2 数字调压器结构框图

数字电压调节器与模拟式电压调节器的工作原理是相同的, 而两者主要的区别是产生控制信号的方法不同。数字调压器的工作原理为: 发电机的输出电压 U_{gen} 和励磁电流 I_f 经过功率板上模拟量调理电路检测之后再输出到 DSP 的 A/D 转换模块, 将模拟量信号转换成数字量信号。DSP 根据采样得到的数字量信号, 利用合适的算法生成 PWM 波, 再经过功率放大电路来控制 MOS 管的开关状态。利用软件算法实时跟踪发电机输出电压的变化, 改变 PWM 的占空比, 改变励磁电流, 从而达到稳定发电机输出电压的目的。同时, 通过模拟量调理电路检测发电机的负载电流 I_{load} 、励磁电压 U_f 、定子温度 T_{st} , 由软件控制是否有过载、过压、过温等故障进行保护。

3 数字调压器的硬件设计

调压器检测以下几个模拟量: 三相交流电压 U_{gen} , 负载电流 I_{load} (交流发电机输出电流)、励磁电流 I_f 、励磁电压 U_f 、定子温度 T_{st} 。

3.1 非相似双余度发电机电压检测电路

无论基于何种控制机理的发电机调压器, 都需要对控制对象进行适时有效的检测。调压器必须通过检测发电机输出电压大小才能调节发电机励磁电流, 发电机电压检测电路的性能对电压调节的精度和稳定性有着决定性的影响。

首先对发电机输出的三相交流电进行降压处理, 通过电阻分压使其电压值在运算放大器可接受的电压范围内。如图 3 所示, 以 A 相为例, 当发电机输出额定电压 220 V 时, 降压变换电路输出幅值为 7.73 V 左右的正弦波。

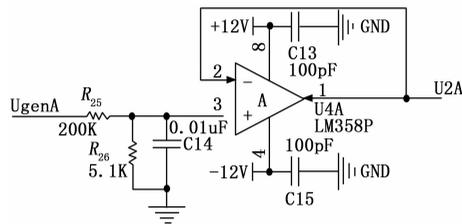


图 3 降压变换电路 (以 A 相为例)

采用两种形式的电压检测变换电路:

一种是平均值检测, 如图 4 所示。发电机输出额定电压时, U_{TABC} 输出为 2.1 V 左右的直流电。

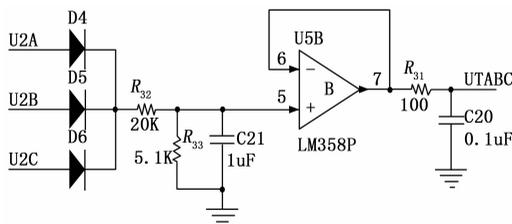


图 4 电压平均值检测电路

另一种方式是每相电压都检测, 如图 5 所示, 以 A 相为例。采用升压电路将变换后的三相交流电抬升到正值, 再由 DSP 读取电压值进行有效值计算。发电机输出额定电压时, 抬升后的电压在 0.245 5~1.254 5 V 之间。

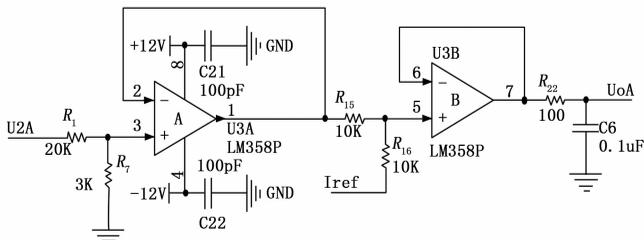


图 5 电压抬升电路 (以 A 相为例)

这两种电压检测电路构成了非相似双余度电压检测电路。平均值检测电路反应速度快, 滞后时间少, 可以用来作为电压调节反馈检测电路, 使得系统动态响应好。电压

有效值检测电路能真实反映电压的有效值，可以作为发电机保护的参考指标，能够对发电机进行有效的保护，也作为平均值电压检测电路的备份。

3.2 励磁电流检测电路

励磁电流检测电路如图 6 所示。选择传感器的型号为 ACS714LLCTR-20A-T，工作温度为 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，灵敏度为 100 mV/A ，传感器的供电电压为 5.0 V ，响应速度为 $5\text{ }\mu\text{s}$ 。芯片的输出电压（单位为 V）为：

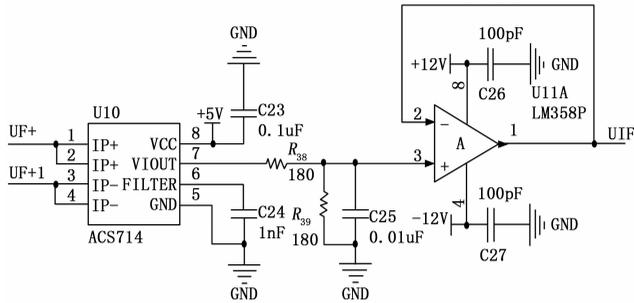


图 6 励磁电流检测电路

$$V_{out} = 0.1I_f + 2.5 \quad (1)$$

柴油发电机组指标中提出，励磁电流连续时为 6 A ，最大值不超过 10 A 。当励磁电流大于 12 A （持续时间 1 s ）时，应当直接关断输出，并发出励磁过流报警。在设计时留出余量，取励磁电流最大为 20 A ，则该电路输出的最大电压为 4.5 V 。UF+ 和 UF+1 接在励磁电源输出和励磁绕组之间。当 VIOUT 输出为 4.5 V 时，UIF 为 2.89 V 。

3.3 励磁电压检测电路

励磁电压检测电路采用中旭的电压型霍尔传感器，型号为 HNV-300T 5 V ，电压测量范围是 $0\sim \pm 450\text{ V}$ ，额定输出电压为 5 V 。VF+ 和 VF- 分别接在励磁绕组的两端，经霍尔传感器测量转换之后，再接分压电阻电路。

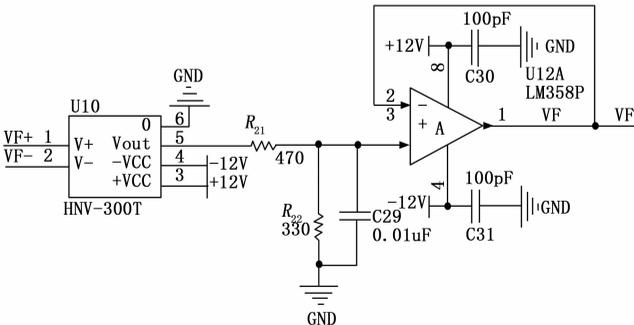


图 7 励磁电压检测电路

3.4 励磁主电路

励磁主电路有三种方案可以选择：单相桥式整流、三相半波整流以及三相桥式整流。当输入为 220 V 三相交流电时，单相桥式整流输出电压平均值为 198 V ，三相半波整流输出电压平均值为 257.4 V ，三相桥式整流输出电压平均值为 514.8 V 。

如果采用三相桥式整流的方式作为主电路，那么滤波

电容的耐压值太高，并且电流相应也比另外两种方式大，滤波电容不易选取并且会增加调压器的体积和重量。比较单相整流和三相半波整流，虽然三相半波整流的输出电压平均值比单相桥式整流的输出电压平均值要大 50 V 左右，但是三相半波整流电路的输出电压脉动比单相桥式整流小一些，所以最终选取的整流方式是三相半波整流。

励磁主电路如图 8 所示，励磁源来自发电机的输出，UGENA、UGENB、UGENC 经过二极管 D18~20 组成的半桥整流电路整流之后，再由大电容 C16 滤波。

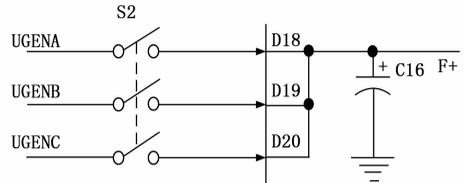


图 8 励磁主电路

3.5 励磁驱动功率放大电路

功率放大电路的作用是对 PWM 控制信号实现功率放大，使其能够驱动主功率管 MOS 管，电路原理图如图 9 所示。高速驱动开关 SN75451 的作用是实现逻辑“与”关系。当 PWM 信号为高电平的时候，SN75451 的输出为高，NPN 型三极管 Q_3 导通，拉低 MOS 管 Q_5 的栅极电压，从而 MOS 管关断，栅源电容上的电荷经过二极管迅速放掉。当 PWM 信号为低电平的时候，SN75451 的输出为低，NPN 型三极管 Q_3 关断，工作电源通过 R_{19} 和 R_{37} 向 MOS 管 Q_5 的栅源电容充电，当栅极电压满足大于开启电压的条件时，MOS 管随即导通。电路的 F+ 和 F- 一端分别接在励磁绕组的两端。RCD 电路的作用是吸收电压尖峰。

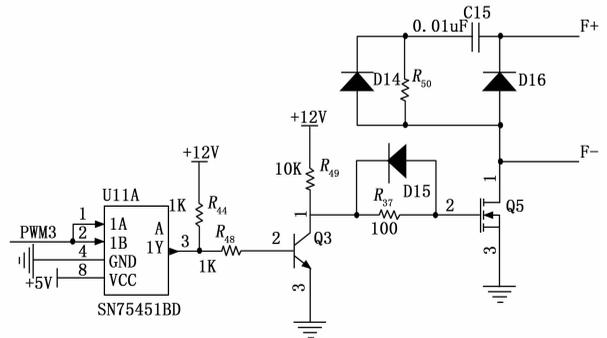


图 9 励磁驱动功率放大电路

4 数字调压器的软件设计

本数字调压系统的核心为 DSP 控制器。通过输入输出接口电路采样发电机输出电压 U_{gen} 、输出电流 I_{load} 、频率 F_{req} 等参数，利用 DSP 完成调压算法，最终输出 PWM 波控制励磁电流从而达到调节电压的目的。

本数字调压器的 DSP 控制器采用的是 TI 公司的型号为 TMS320F28335 的 32 位浮点高性能微控器。该控制器拥有强大的数据处理能力，可以对复杂的控制算法进行实时运算，能够保证数字调压器的实时控制性能。同时，其数据

程序存储量和 A/D 转换的精度可以满足本调节系统的要求。

DSP 最小系统结构图如图 10 所示, 包括 DSP 及其外围电路。为提高系统的可靠性, 降低研制风险, 减少研制时间, DSP 板采用北京达盛科技有限公司的 TechV_28335 板卡。板卡通过两排接口与输入输出接口电路板进行连接。

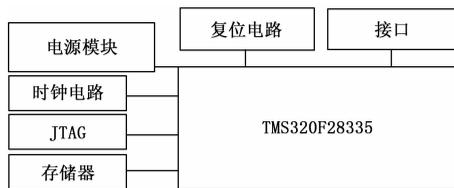


图 10 DSP 最小系统结构图

4.1 软件总体流程

调压器软件总体流程如图 11 所示。通过判断发电机的转速是否达到规定值来决定调压器是否工作。当励磁电压值低于安全值, 关闭调压系统。

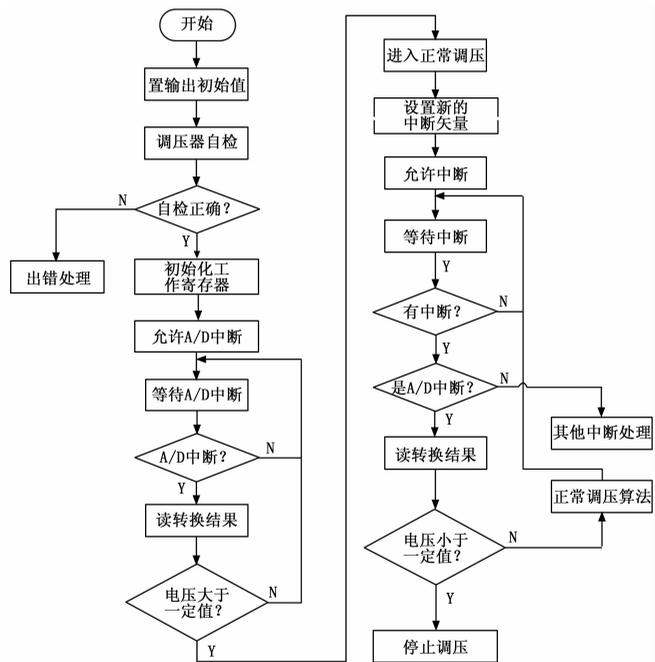


图 11 数字调压器软件流程图

先设置调压器的初始值, 并进行自检, 自检正确时, 初始化工作寄存器, 允许 A/D 中断。等待 A/D 转换后, 利用数字值判断输出电压的大小, 当其大于一定值时, 既可以进行正常调压, 如果不满足条件则继续等待 A/D 中断。进入正常调压之后, 设置新的中断矢量, 当输出电压值低于设置值时, 关闭调压系统, 否则继续进行调压步骤。

4.2 控制算法结构

调压器主要有如下几种控制方式: 电压单环调节、电压及负载电流双环调节、电压及励磁电流双环调节^[4,9]、输出电压反馈调节中加入励磁电流的调节结构。本文选取电压、励磁电流双环调节系统, 其结构如图 12 所示。

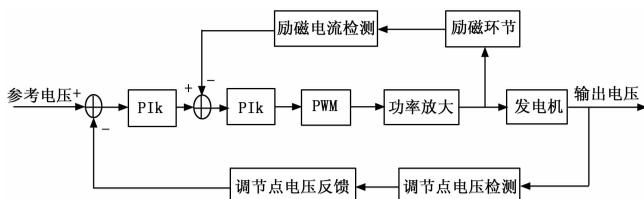


图 12 电压、励磁电流双环调节系统结构框图

载。交流发电机电压调节器数字控制策略主要有: 数字控制策略^[10]、自适应的控制策略^[11]、模糊控制策略^[12]。本文通过调节励磁电流, 控制主发电机的电压。但是, 采样得到的反馈信号中含有谐波脉动成分, 它会影响控制器的稳定性。为此, 采用整周期平滑滤波来消除谐波脉动。

发电机在运行过程中, 需要施加或者卸去满载幅度的载荷, 在该工作状态下, 系统要求调节时间和超调量满足相应的要求。一般的 PI 算法具有在大偏差时积分累积过大以及超调过大的缺点, 不能满足本系统要求。所以, 为了提高调压器的快速性, 本文采用复合 PID 控制算法。

5 实验

在对调压器的硬件电路及软件算法进行测试之后, 搭建系统实验平台, 如图 13 所示。其中发电机的额定输出功率为 20 kVA, 额定输出相电压为 230 V, 频率为 50 Hz。

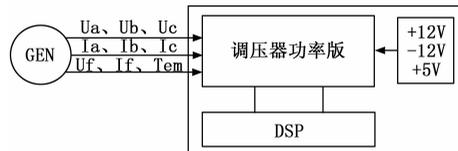


图 13 系统实验平台框架图

5.1 逐级加卸载实验

采用三台可编程电子负载做逐级加卸载实验。由于实验设备的限制, 三台可编程电子负载最大输出 12.9 kVA, 因此逐级加载最大只能做到 50%~65%, 即从 10 kVA 逐级加载到 12.9 kVA。

$U=230\text{ V}$ 、 $PF=1$ 条件下, 测试结果如表 1 所示。

表 1 逐级加卸载实验测试结果 ($U=230\text{ V}$ $PF=1$)

P (三相 kVA)		稳态电压/V	稳态电压变化/V	励磁电流/A	稳定时间/ms	峰值变化/V
0	空载	230.20		0.24		
5(25%)	加载	229.94	0.26	0.28	121.875	7.5
10(50%)	加载	229.65	0.29	0.38	181.25	10
12.9(65%)	加载	229.33	0.32	0.48	121.875	6.875
10(50%)	卸载	229.53	0.2	0.39	340.625	8.125
5(25%)	卸载	229.75	0.22	0.28	203.125	11.875
0	空载	229.96	0.21	0.23	212.5	11.0

5.2 突加突卸负载实验

分别进行突加和突卸 12.9 kVA 阻性负载的实验, 测试结果如表 2 所示, 发电机输出电压的波形图如图 14 和图 15 所示。可以看出, 调压器分别利用 212.5 ms 和 431.25 ms

完成了调压过程。

表 2 突加突卸负载实验测试结果 ($U=230V PF=1$)

P (三相 kVA)		稳态电 压/V	稳态电压 变化/V	励磁电 流/A	稳定时 间/ms	峰值变 化/V
0	空载	229.96	0.21	0.23	212.5	11.0
12.9 (65%)	加载	229.03	0.78	0.47	212.5	24.6
0	空载	229.90	0.72	0.23	431.25	27.5

GJB 235A—1997 军用交流移动电站通用规范规定, 指标类别为 I 的柴油机稳态电压调整率为 $\pm 1.0\%$, 瞬态电压调整率为 $\pm 15\%$, 电压稳定时间为 0.5 s。表 1 和表 2 的实验结果表明, 本数字调压系统达到了该标准中类别为 I 的柴油机的要求。

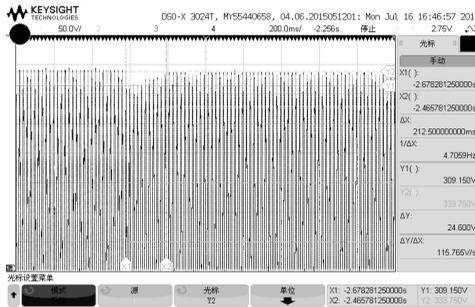


图 14 突加 12.9 kVA 阻性负载时的电压波形图

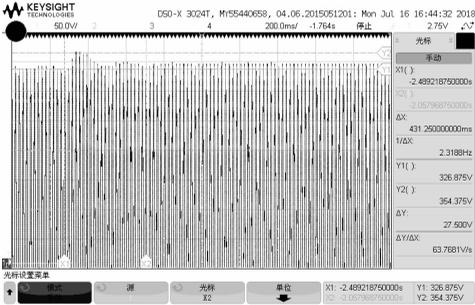


图 15 突卸 12.9 kVA 阻性负载时的电压波形图

6 总结

本文针对某型车辆柴油发电机设计了基于 TMS320F28335

(上接第 191 页)

[3] Hartley R I. Euclidean reconstruction from uncalibrated views [M]. Applications of Invariance in Computer Vision, 1994.

[4] Triggs B. Autocalibration and the absolute quadric [A]. Conference on Computer Vision & Pattern Recognition [C]. 1997.

[5] Heyden A, Astrom K. Euclidean Reconstruction from Image Sequences with Varying and Unknown Focal Length and Principal Point [A]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition [C]. IEEE, 1997.

[6] Habed A, Boufama B. Camera self-calibration from bivariate polynomials derived from Kruppa's equations [M]. 2008.

[7] Hartley R I. Kruppa's equations derived from the fundamental matrix [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine

芯片的数字调压器。主要介绍了硬件电路中的非相似双余度电压检测电路、励磁电流检测电路、励磁电压检测电路、励磁主电路和励磁驱动放大电路。采用以 TMS320F28335 为核心的 DSP 最小系统, 利用电压、励磁电流双环调节的方式, 采用复合型 PID 软件控制算法。搭建系统实验平台, 对调压器进行逐级加载卸载、突加突卸负载测试, 能够满足 GJB 235A—1997 军用交流移动电站通用规范中指标类别为 I 的柴油机功能要求。

参考文献:

[1] 王艳芳. 全数字发电机控制器通用开发平台的硬件设计与实现 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

[2] 董希建. 飞机交流发电机控制器的技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.

[3] 吴颜飞, 毕 锋, 李蔚超. 汽车高压直流发电机调压系统的设计 [J]. 汽车电器, 2016 (9): 4-6.

[4] 陈志辉. 无刷发电机数字调压技术的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.

[5] 管定销, 张晓斌, 郑先成. 基于 DSP 的数字发电机调压器设计 [J]. 机电一体化, 2011, 17 (7): 65-68.

[6] 杨春源. 转子磁分路混合励磁同步发电机数字调压技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[7] Chen Z H, Chang S J. Research on the digital voltage regulator on a VSCF AC power system [A]. International Conference on Electrical Machines & Systems [C]. IEEE, 2001.

[8] 黄玉珍. 基于 FPGA 的数字电源调节器研究与设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30 (10): 1334-1336.

[9] 邱旭强. 电励磁双凸极发电机调压系统研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[10] Sedaghati A. A PI Controller Based on Gain-Scheduling for Synchronous Generator [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2014, 14 (2): 241-251.

[11] Cheng C H, Hsu Y Y. Excitation control of a synchronous generator using a lookup table [J]. IEEE, Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27 (2): 247-254.

[12] Chen T C, Chen T R, Chang W T. Implementation of AC line voltage regulator (AVR) with fuzzy control theory [J]. IEEE, 2001: 422-424.

[13] 李红亚, 彭显忠, 邓楚燕, 等. GA 与 PSO 的混合研究综述 [J]. 计算机工程与应用, 2018.

[9] 徐宗本, 高 勇. 遗传算法过早收敛现象的特征分析及其预防 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1996 (4): 364-375.

[10] 熊邦书, 黄武涛, 李新民. 基于改进遗传算法的摄像机标定参数优化方法 [J]. 半导体光电, 2016, 37 (1).

[11] Lourakis M I, Deriche R. Camera self-calibration using the singular value decomposition of the fundamental matrix: From point correspondences to 3D measurements [R]. INRIA, Sophia-Antipolis: Research Report 3748, 1999.

[12] 刘 睿, 王 锋. 一种基于改进遗传算法的摄像机自标定方法 [J]. 光盘技术, 2008 (5): 43-45.