

馈能式电子负载及并网方案的设计与应用

彭 健, 周 皓

北京航化节能环保技术有限公司 北京

【摘要】本文设计并实现了一种可编程多通道馈能式电子负载及并网方案,旨在解决传统电子负载测试过程中的能源浪费问题,电子负载通过 Boost 隔离升压和双闭环控制,实现高精度恒压/恒流模式,并网逆变器选用中低压拓扑结构,具有快速响应、高转换效率($\geq 90\%$)及低谐波干扰等特点,符合相关国家标准。此外,系统采用模块化结构设计,优化散热风道,并配备高精度采样电路,使电压和电流测量精度分别达到 0.2%和 0.5%。该方案在稳定性、效率和兼容性方面均表现优异,适用于各类电源测试场景,并为可再生能源并网应用提供了可靠的技术支持,具有显著的节能效益和工程应用价值。

【关键词】馈能式电子负载; 并网逆变器; 能量回馈

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 18 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250050

Design and application of energy-fed electronic load and grid-connected scheme

Jian Peng, Hao Zhou

Beijing Hanghua Energy Saving and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing

【Abstract】 This paper designs and implements a programmable multi-channel regenerative electronic load and grid connection scheme, aiming to solve the problem of energy waste in the traditional electronic load testing process. The electronic load achieves high-precision constant voltage/constant current modes through Boost isolated boost and dual closed-loop control. The grid inverter adopts a medium and low voltage topology structure, featuring fast response, high conversion efficiency ($\geq 90\%$), and low harmonic interference, which complies with relevant national standards. Additionally, the system adopts a modular structure design, optimizes the heat dissipation air duct, and is equipped with high-precision sampling circuits, enabling voltage and current measurement accuracies of 0.2% and 0.5% respectively. This scheme performs excellently in terms of stability, efficiency, and compatibility, and is suitable for various power supply testing scenarios. It also provides reliable technical support for renewable energy grid connection applications, demonstrating significant energy-saving benefits and engineering application value.

【Keywords】 Energy-fed electronic load; Grid-connected inverter; Energy feedback

引言

随着能源需求的不断增长和环境保护意识的日益提升,高效能源利用和可再生能源技术的研究与应用成为当前的热点。馈能式电子负载作为一种能够将电能回馈至电网的先进测试设备,不仅能够模拟传统电子负载的功能,还能实现能量的高效回收,显著降低测试过程中的能源浪费。然而,传统的馈能式电子负载在母线电压设计、系统效率、多通道

控制等方面仍存在诸多挑战。为此,本文提出了一种可编程多通道馈能式电子负载及并网方案,通过优化母线电压选择、采用先进的环路控制技术以及模块化设计,实现了高精度、高效率、高可靠性的能量回馈功能。

本方案不仅适用于各类电源测试场景,还能为电网提供稳定的能量回馈,具有重要的工程应用价值和经济效益。

作者简介: 彭健(1992-)女,汉族,河北石家庄,硕士,北京航化节能环保技术有限公司,中级,研究方向:石化节能环保技术、经营采购管理;周皓(1986-)男,汉族,河北廊坊,硕士,北京航化节能环保技术有限公司,副高级工程师,研究方向:石化节能环保技术、经营采购管理。

1 总体概述

馈能式电子负载系统由可编程多通道馈能式电子负载及并网逆变器两部分组成。方案的整体连接方式如图 1 所示。

如图 1 所示, 被测 DCDC 电源的输出连接到馈能式电子负载的输入端, 通过隔离升压将输入电压提升至直流母线电压以上, 由于逆变器单元会自动

稳定直流母线, 馈能式电子负载将进入恒流工作模式, 母线电压由逆变器控制, 同时逆变器将馈能负载输出的能量回馈至交流电网中。

2 可编程多通道馈能式电子负载设计方案

如图 2 所示, 可编程多通道馈能式电子负载主要由馈能负载模块单元、背板单元、辅助供电单元和控制单元构成。

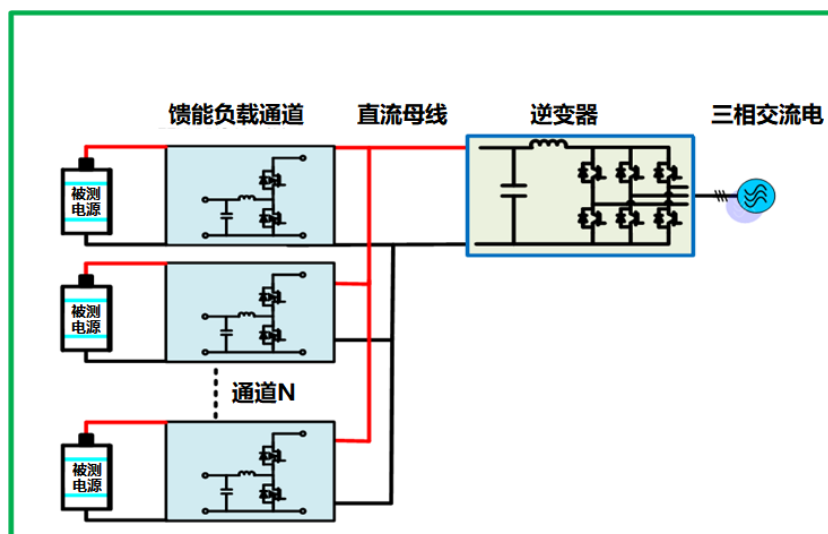


图 1 馈能式电子负载系统组成

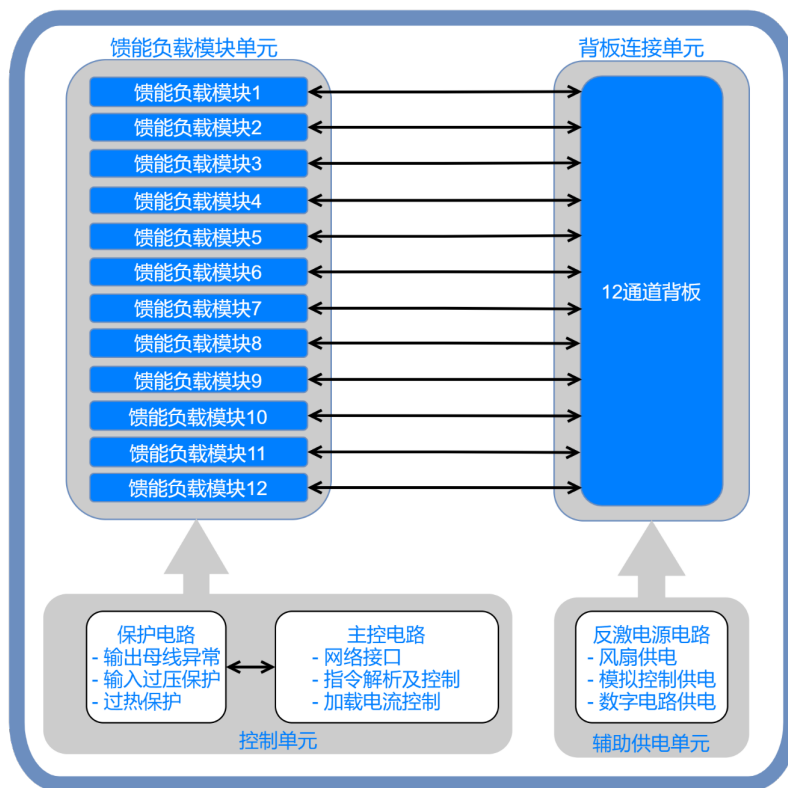


图 2 可编程多通道馈能式电子负载构成框图

2.1 馈能负载模块单元设计

馈能负载模块单元由 Boost 隔离升压变换电路、环路控制电路及数字控制电路组成, 详见图 3。

如图 3 所示, 馈能式负载模块将被测 DCDC 的输出电压通过隔离升压变换电路升压至所需母线电压。控制环路采用电压、电流双闭环控制方式, 数字控制电路可接收系统控制指令并转化为模拟电压/电流基准, 进而控制馈能式负载模块工作在恒压或恒流模式下。

2.2 直流母线电压的选择

本方案设计采用 81V 电压作为直流母线电压, 一是减轻馈能负载输出端电压应力, 降低成本; 二是 81V 直流母线是锂电池模组测试多采用的母线电压, 逆变器技术成熟。

3 并网逆变器设计方案

如图 4 所示, 为保证并网逆变器可靠工作, 三相电经断路器后经过滤波器, 经交流接触器后连接至逆变器的交流输入侧。

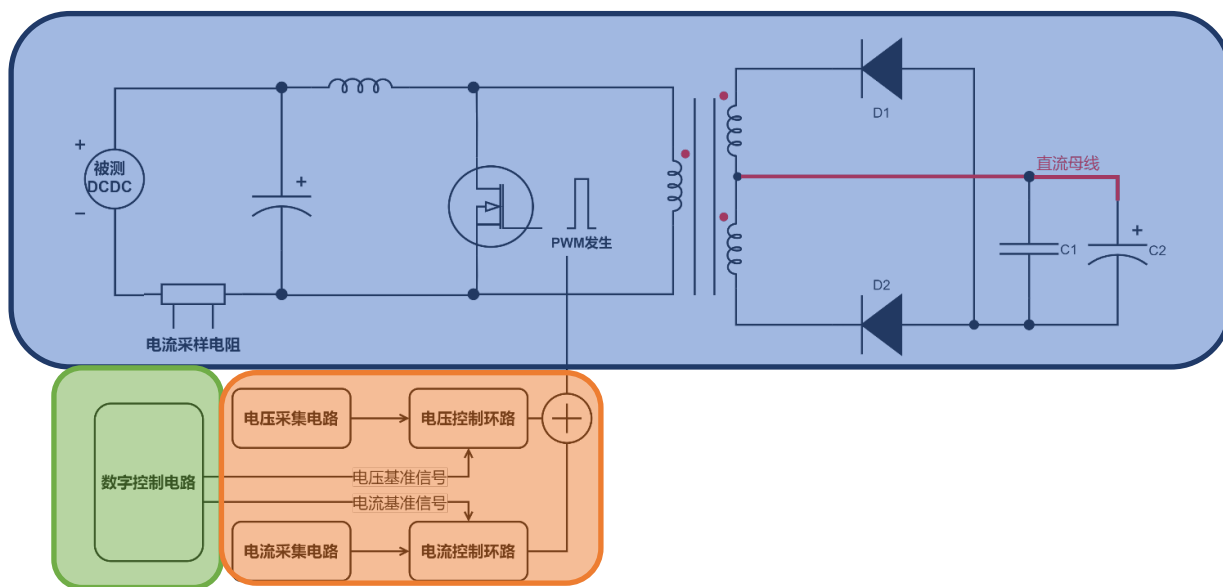


图 3 馈能式负载模块构成框图

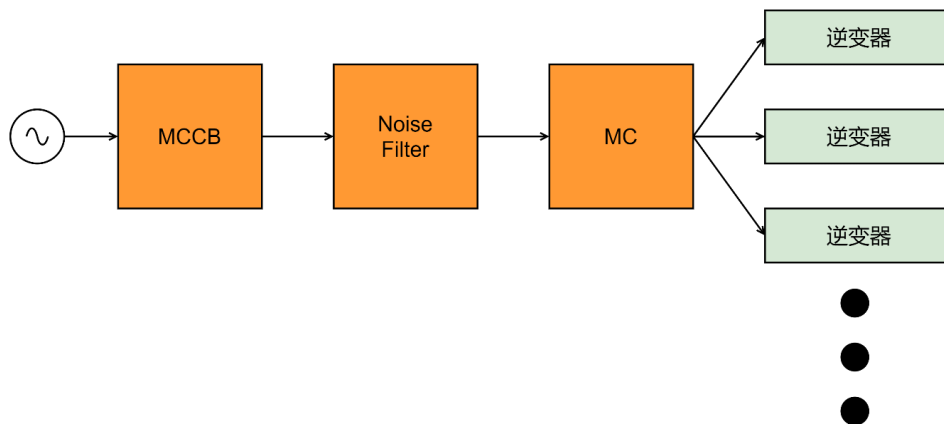
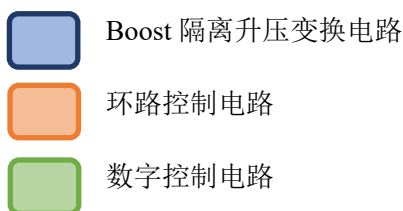


图 4 并网逆变器组成

MCCB-断路器用于接通或断开三相交流电, 为防止逆变器干扰电网, 在并网侧加入高性能滤波器。配置交流接触器及急停开关, 以确保电网异常, 或逆变器工作异常时, 可自动快速切断逆变器与电网的连接, 防止造成二次伤害。

4 设计性能指标

(1) 电子负载具有 12 个独立输入通道, 单通道加载功率不小于 300W, 总加载功率不小于 3600W。

(2) 电子负载单通道输入电压范围 5~60VDC, 采集输入电压精度优于 1%; 本方案具有 1% 的电压采样设计精度, 电压采集电路采用如图 6 所示的差分电路, 在抑制共模干扰提高采样置信度的同时, 可实现较高的采样精度。本方案拟采用高分辨率 ADC。此方案可将电压采样精度提升至 0.2%。

(3) 电子负载单通道输入电流范围 0.5~20A, 加载电流精度 1%FS; 本方案电流取样电路如图 7 所示, 图中电阻 R4 为电流采样电阻, 出于功耗及发热量的考虑, 电流取样电阻的阻值必须要足够小, 一般只有几十毫欧姆。额定电流流过取样电阻得到的电压信号一般在 0.2~0.3V 左右, 为了与基准电压进行比较, 须将这个电压信号放大到与基准电压相当的级别。

电流取样放大电路的输出 $OUT=VR4 \times N$ 。以电流取样电阻上电压信号为 0.25V, 基准信号为 2.5V 为例, $N=2.5 \div 0.25=10$ 。电流取样放大电路的输出给到电流误差放大单元(图 8), 通过与电流基准信号作比较, 产生恒流控制信号。本方案可将电流控制及采样精度提升至 0.5%。

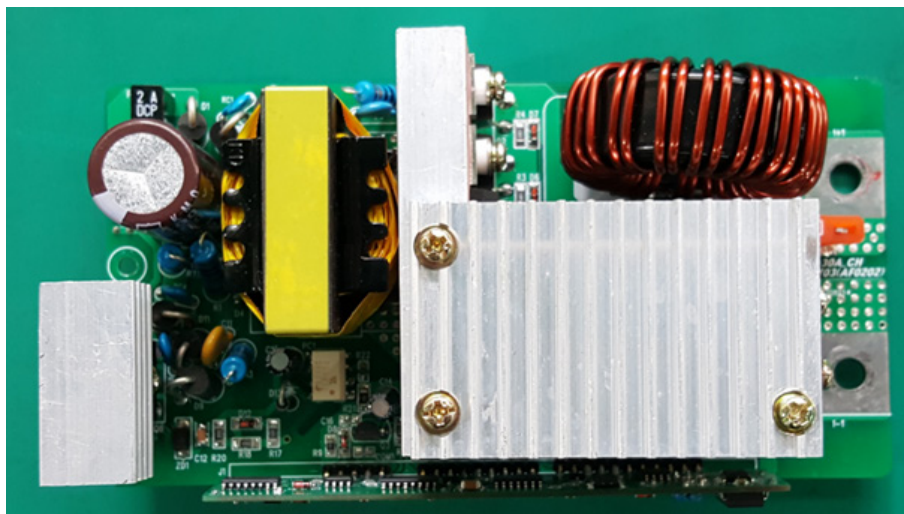


图 5 回馈式负载通道模块

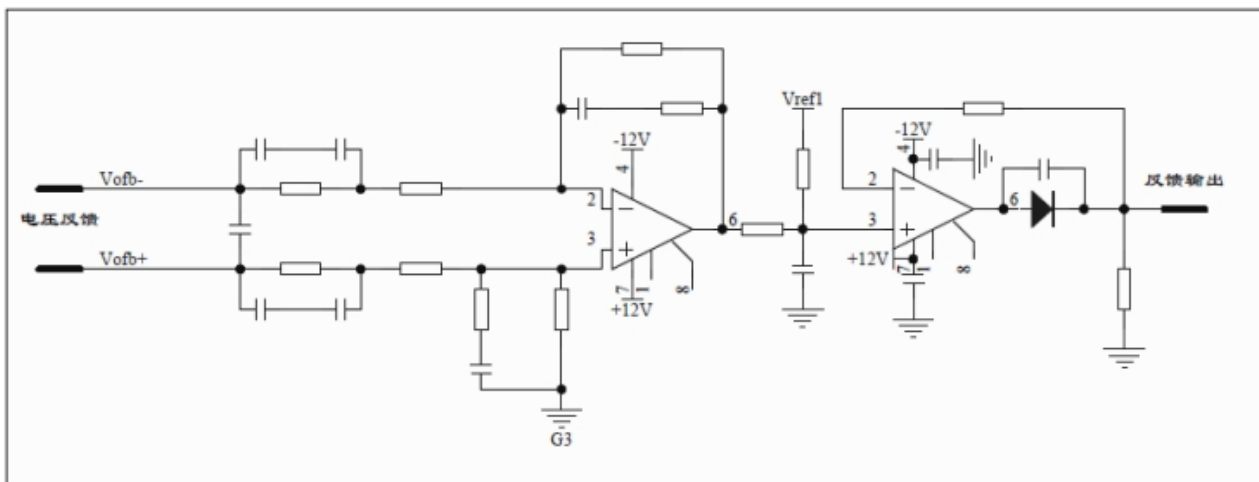


图 6 差分采样电路

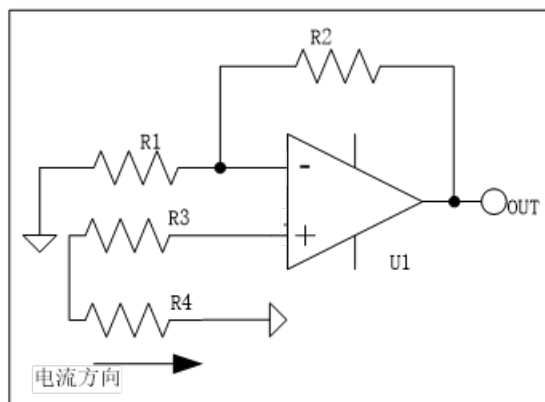


图 7 电流取样放大电路示意图

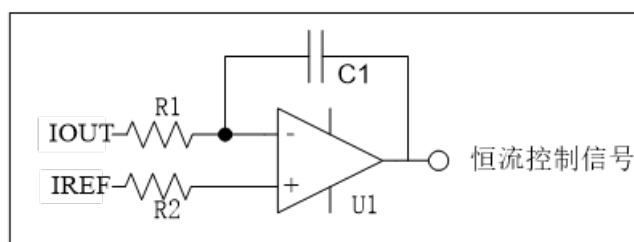


图 8 电流误差放大单元

(4) 电子负载电能回馈效率 $\geq 90\%$ （满载条件下）；馈能式电子负载的损耗主要来自于两部分，一是开关管的开关及导通损耗，另一个母线侧整流二极管的损耗。开关管开关损耗可以引入软开关技术来降低，导通损耗，由于输入电压较低，低压 MOS 的导通电阻非常低，此部分损耗也相对较低。母线侧整流二极管的电流较小。本方案可满足 $\geq 90\%$ 的回馈效率要求。

(5) 平均故障间隔时间(MTBF): 不低于 20000 小时（不含风扇）。

(6) 电子负载配套逆变器对电网产生的谐波干扰符合 GB/T 37408-2019 及 GB/T 19939-2005 的相关要求。

5 结语

本文设计并实现了一种可编程多通道馈能式电子负载及并网方案，通过采用 81V 低压直流母线设计，显著降低了系统成本与复杂度，同时提升了安全性和可靠性。馈能负载模块采用 Boost 隔离升压变换电路和双闭环控制技术，实现了高精度的恒压或恒流模式工作。并网逆变器选用中低压逆变器，具备快速启动、高效率 and 低谐波干扰等优点，确保

了电能的高效回馈。此外，模块化的结构设计和科学的散热方案进一步提高了系统的稳定性和使用寿命。实验结果表明，该方案在满载条件下的电能回馈效率达到 90% 以上，电压和电流采样精度分别优于 0.2% 和 0.5%，完全满足实际应用需求。本方案不仅为电源测试提供了高效节能的解决方案，也为可再生能源并网技术的发展提供了有力支持，具有广阔的市场前景和应用潜力。

参考文献

- [1] 张兴, 曹仁贤. 《并网逆变器与可再生能源发电技术》. 机械工业出版社, 2014.
- [2] Wang, Y., et al. "Design of a Bidirectional DC-DC Converter for Low-Voltage DC Microgrid Applications." IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4563-4572.
- [3] 李志刚, 等. "可编程多通道电子负载的分布式控制方法." 《电工技术学报》, 2019, 34(10): 2128-2136.
- [4] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. Fundamentals of Power Electronics. Springer, 2020.

- [5] GB/T 37408-2019 《光伏发电并网逆变器技术要求》.
- [6] GB/T 19939-2005 《光伏系统并网性能要求》.
- [7] Zhang, C., et al. "A High-Efficiency Energy Recovery Electronic Load with Adaptive Control." IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), 2020.
- [8] 王磊, 等. "大功率电子设备的热管理与可靠性分析." 《电力电子技术》, 2021, 55(3): 45-50.
- [9] Texas Instruments. Precision Voltage and Current Sensing for Power Electronics. Application Report, 2018.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS