

doi: 10.7690/bgzdh.2020.06.007

基于 LTC3789 的高功率密度电源变换器

周应旺, 应浩, 曲鹏

(南京模拟技术研究所, 南京 210016)

摘要: 为满足三相交流发电机后端直流稳压电源宽电压幅值、宽频率输入, 高功率密度、高效率 and 频率测量的要求, 对基于 LTC3789 的高功率密度电源变换器进行研究。以高性能升降压式开关稳压控制器 LTC3789 作为主控电路进行电路设计, 采用电压过零检测电路检测发电机频率, 并对电源进行测试实验。结果表明: 该电源电路输出电压稳定, 具有较高的功率密度和效率, 使电源满足使用要求。

关键词: LTC3789; 升降压电路; 高功率密度; 频率检测

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

High Power Density Power Converter Based on LTC3789

Zhou Yingwang, Ying Hao, Qu Peng

(Nanjing Research Institute on Simulation Technique, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to meet the requirements of wide voltage amplitude, wide frequency input, high power density, high efficiency and frequency measurement of three-phase AC generator back-end DC regulated power supply, a high power density power supply converter based on LTC3789 is studied. The high performance boost-buck switching regulator LTC3789 is used as the main control circuit to design circuit. Use voltage zero crossing detection circuit to detect generator frequency, and carry out test for power supply. The results show that the output voltage of the power supply circuit is stable, the power density and efficiency are high, and the power supply meets the requirements of operation.

Keywords: LTC3789; boost-buck circuit; high power density; frequency detection

0 引言

在各种电子装置中, 以前大量采用线性稳压电源供电。近年来, 由于高频开关电源具有体积小、重量轻和效率高的优点, 已逐渐取代了线性电源。开关电源的拓扑结构主要有正激式和反激式: 正激式开关电源体积大, 反电动势电压高; 反激式开关电源工作效率低, 输出电压和电流特性差^[1], 多用于功率较小的场合, 如家电领域。

笔者设计的电源是针对三相交流发电机后端的直流稳压电源, 具有宽电压幅值、宽频率输入, 输出功率大且不加外部散热器、并具有发电机频率检测信号输出, 要求电源有高的功率密度和效率。三相交流发电机输出电压经整流后电压会高于、低于和等于电源输出电压, 要求电源既可以升压又可以降压, 一般的正激式或反激式电源拓扑无法实现^[2-3]。笔者采用高性能升降压式开关稳压控制器 LTC3789 作为主控电路进行电路设计^[4-5], 并对电源进行实验和测试。实验结果表明, 该电源能够较好地达到使用要求。

1 电源结构概述

电源设计过程中采用模块化设计方法, 整个电源由多个功能模块组成。如图 1 所示, 电源主要由三相全桥整流电路、电压过零检测电路、方波调理电路、辅助电源、低压功率限制电路与功率变换电路等 6 部分组成^[6]。电源首先将输入的三相交流电整流成直流电, 再将直流电通过功率变换器转换成所需要的电压。三相交流电整流需要 6 根高频大功率整流二极管, 当交流输入电压为 20 VAC, 输出功率 850 W 时, 输入电流达到 42.5 A, 此时 6 根高频大功率二极管功耗已高达 170 W, 根据目前现有的技术, 无法降低该部分功耗, 要使电源有高的功率密度和效率, 功率变换器成了本电源的关键。

2 电源电路设计

2.1 三相全桥整流电路

三相全桥整流电路的作用是将三相交流电转换成直流电。该电路主要由输入滤波电感、6 根高频大功率整流二极管和输出滤波电容组成^[7]。滤波电

收稿日期: 2020-02-19; 修回日期: 2020-03-27

作者简介: 周应旺(1985—), 男, 江西人, 硕士, 工程师, 从事发动机控制系统与信号处理、电力电子技术、嵌入式系统开发研究。E-mail: zywwaj@sina.com。

感的作用是消除前端输入源与后端电源之间的相互干扰；6 根高频大功率整流二极管用来将高频三相

交流电转换成直流电；滤波电容用来储能并滤除直流电压中的交流成分。

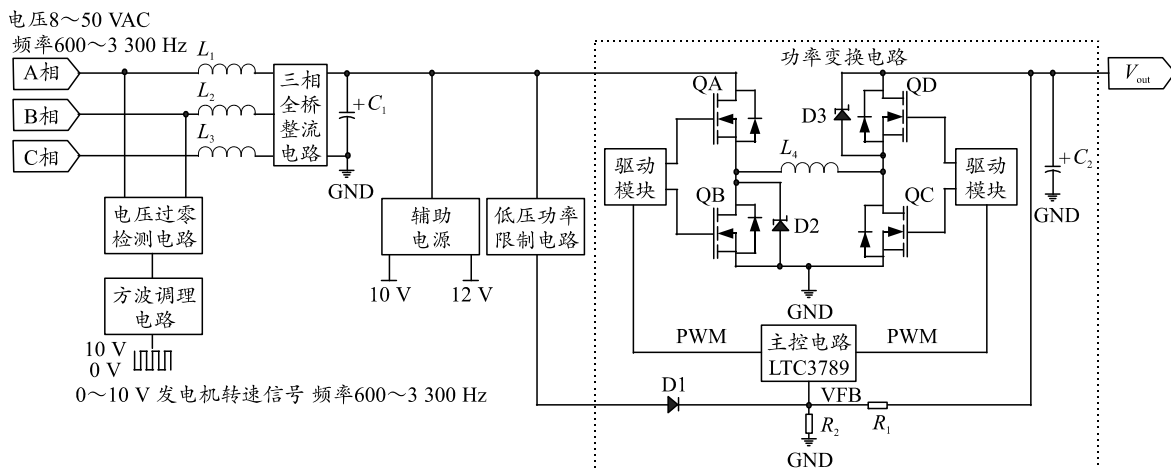


图 1 电源电路原理

2.2 电压过零检测电路

电压过零检测电路用于检测发电机三相交流电的频率。该电路主要由高速光耦和电阻器构成，取三相交流电中的任意两相作为光耦的输入，利用光耦的输入端单向导通特性，输出一个与交流电频率相同的方波。

2.3 方波调理电路

方波调理电路用于将由电压过零检测电路输出的不规则的方波信号转换成 0~8 V 的规则方波信号，便于信号检测电路采集发电机频率信息。该电路主要由 LM555 集成电路、电阻器和电容器组成一个触发器。

2.4 辅助电源

辅助电源用于产生 12 VDC 和 10 VDC 电压，给电源内部器件供电。该电路主要由 TNY280 集成电路、变压器、电阻器和电容器等构成一个反激电源，为内部其他电路提供稳定的直流电压。

2.5 低压功率限制电路

低压功率的限制电路用于限制交流输入电压低于 20 VAC 的电源输出功率。该电路主要由 LM193D 集成电路、电阻器与电容器构成。当检测到交流输入电压低于 20 VAC 时，输出高电平信号至主控电路，调整电压变换器的输出功率，防止发电机在低输出电压时输出电流过大，避免发电机因过载而损毁。

如图 2 所示，低压功率限制检测控制电路由电阻器 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 ，运算放大器 U4 和二极管 V1

组成。通过三相全桥整流输出的电压经电阻 R_1 、 R_2 分压后输入至 U4 的反相输入端 2 脚，U4 的 3 脚经 R_4 连接至 2.5 V 基准电压，当输入交流电压小于 20 VAC 时整流输出电压为：

$$V_{in} < \sqrt{2} \times 20 \text{ V} \approx 28.28 \text{ V}。 \quad (1)$$

V_{in} 经 R_1 、 R_2 分压后电压为

$$V_{R2} < \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} = \frac{10.2}{105 + 10.2} 28.28 \text{ V} \approx 2.5 \text{ V}。 \quad (2)$$

由式(2)可知：分压后 V_{R2} 电压低于 2.5 V，则 U4 的输出端 1 脚输出高电平，经二极管 V1 输入至 LTC3789 的反馈脚 (VFB) 控制电源电压输出；当输入交流电压大于 20 VAC 时，整流输出电压经 R_1 、 R_2 分压后电压高于 2.5 V，则 U4 的输出端 1 脚输出低电平，解除功率限制。 R_3 为负反馈电路，可提高电路的稳定性，消除自激振荡。

2.6 功率变换电路

功率变换电路将三相全桥整流输出的 11~71 VDC 的直流电压转换成稳定的 29 VDC 电源电压输出，是本电源的设计核心。如图 2 所示，本电路主要由以 LTC3789 集成电路为核心的主控电路 D3、IPB065N15N3 型 N 沟道 MOSFET 管 Q1—Q4、UCC27211 高频驱动模块 D1 和 D2、SS110 肖特基二极管 V2 和 V3 与电感 L1 等组成，D3 产生 PWM 信号控制 D1、D2 工作，D1、D2 分别驱动 MOSFET 管 Q1、Q2 和 Q3、Q4，使功率变换电路工作。V2、V3 分别为升压电路和降压电路的续流二极管。

LTC3789 是一款高性能升降压式开关稳压控制器，可工作于输入电压高于、等于和低于输出电压，

工作频率为 200~600 kHz。FREQ 引脚输出 10 μA 电流，可与地之间外接一个电阻，转换成电压配置

芯片工作频率。文中外接一个 121 kΩ 电阻，设置芯片工作在 400 kHz 恒定频率电流模式。

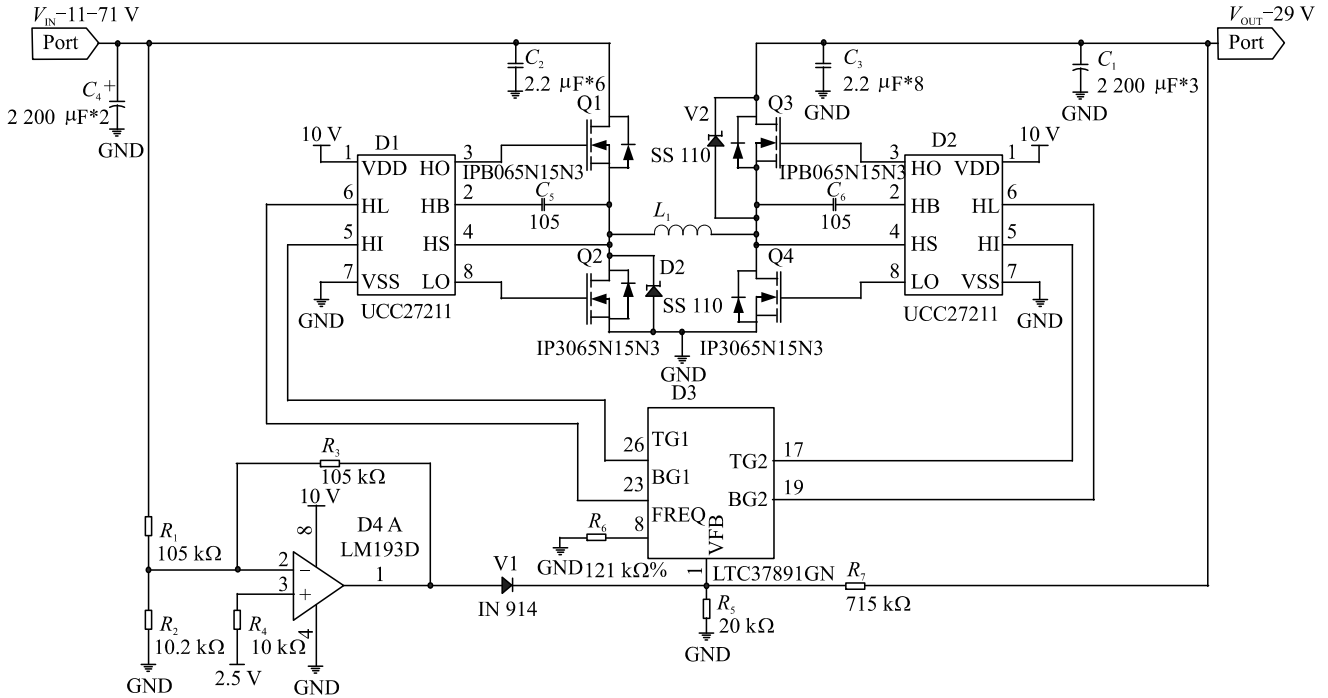


图 2 功率变换电路

当 $V_{in} \geq V_{out}$ 时，工作在降压模式。首先 Q3 处于导通状态，Q4 处于关闭状态。在每个周期开始时 Q2 导通，同时检测出电感电流，当感应到的电感电流低于与 V_{ith} 成比例的参考电压要求值时 Q2 关闭，Q1 导通并保持到本控制周期结束。随后 Q1 和 Q2 交替工作，与典型的降压斩波电路工作类似。控制 Q1 导通的 PWM 占空比最大可达到 91.67%。

当 $V_{in} \approx V_{out}$ 时，工作在升降压模式。当 V_{in} 接近 V_{out} 时，控制器进入升降压模式，在每个周期起始阶段，如果控制 Q2 和 Q3 先导通，则首先在降压模式。当 I_{cmp} 触动时 Q2 关闭，Q1 导通。在 120° 时钟相位处 Q3 关闭，Q4 导通，此时工作在升压模式。在 I_{cmp} 触动之前，LTC3789 一直工作在升压模式， I_{cmp} 触发后 Q4 关闭，Q3 导通并保持到本控制周期结束，此时既不工作在升压区又不工作在降压模式，而是 $V_{out} = V_{in}$ 。如果控制 Q1 和 Q4 先导通，则首先在升压模式，当 I_{cmp} 触动时 Q4 关闭，Q3 导通，在 120° 时钟相位处 Q1 关闭，Q2 导通，此时工作在降压模式。但 I_{cmp} 触动时 Q2 关断，Q1 导通并保持到本控制周期结束，此时既不工作在升压区又不工作在降压模式，而是 $V_{out} = V_{in}$ 。

当 $V_{in} \leq V_{out}$ 时，工作在升压模式。首先 Q1 处于导通状态，Q2 处于关闭状态，在每个周期开始时 Q4 导通，同时检测出电感电流，当感应到的电感电

流超过与 V_{ith} 成比例的参考电压要求值时 Q4 关闭，Q3 导通并保持到本控制周期结束，随后 Q3 和 Q4 交替工作，与典型的升压斩波电路工作类似。控制 Q4 导通的 PWM 占空比最小可达到 8.33%。

电源输出电压大小由连接至 V_{out} 端的外部反馈电阻分压器 R_5 和 R_7 设置，通过误差放大器将所产生的反馈信号与内部精确的 0.8 V 电压基准进行比较，将误差输入至负反馈调节电路的前馈端，调整电源输出电压，使其稳定在设计范围内。电源输出电压为

$$V_{out} = 0.8 \left(1 + \frac{R_7}{R_5} \right) \quad (3)$$

将 $R_5 = 20 \text{ k}\Omega$ ， $R_7 = 715 \text{ k}\Omega$ 代入式(3)得电源输出电压

$$V_{out} = 0.8 \left(1 + \frac{715}{20} \right) \approx 29 \text{ V} \quad (4)$$

3 实验

实验中三相交流发电机输出电压幅值 8~40 VAC、频率 660~3 300 Hz。采用文中电源拓扑结构设计了一款电源，尺寸为 160 mm×125 mm×55 mm、输入电压大于等于 20 VAC 时额定功率 29 V/850 W，高温工作环境温度 50 °C，并且电源具有发电机频率检测信号输出。经实验测得发电机频率检测信号

输出波形如图 3 所示，电源输出电压特性如表 1 所示，在环境温度 50 °C 保温 2 h 后开始进行高温工作测试，采用交流调压器模拟三相交流发电机给电源输入 35 VAC 电压，电源输出接电子负载，给定 850 W 负载，各关键器件温度随时间变化特性如表 2、图 4 所示。

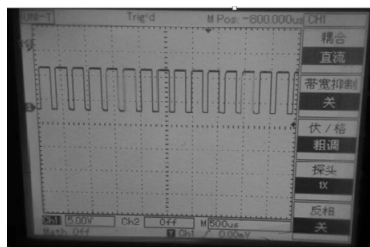


图 3 发电机频率检测信号波形

表 1 电源输出电压特性

序号	发电机频率/kHz	U_{ab}/V	U_{bc}/V	U_{ca}/V	输出电压/V
1	1.00	12.2	12.2	11.9	0
2	1.50	17.5	17.8	17.4	23.2
3	2.00	23.2	23.5	22.9	29.4
4	2.31	27.1	27.7	26.8	29.4
5	2.50	29.6	30.4	29.4	29.4
6	2.66	32.2	31.7	32.7	29.4
7	2.85	34.4	34.0	35.3	29.4
8	3.10	37.3	37.2	37.5	29.4

表 2 各关键器件温度随时间变化特性

序号	时间/min	输入电压/VAC	负载/W	机壳温度/°C	整流桥温度/°C	MOSFET 温度/°C	电感温度/°C
1	10	35	850	78.4	113	120.0	110
2	20	35	850	78.4	113	124.8	110
3	30	35	850	78.0	112	125.0	108
4	40	35	850	78.3	112	125.0	110
5	50	35	850	77.0	113	126.0	110
6	60	35	850	77.0	113	125.0	110

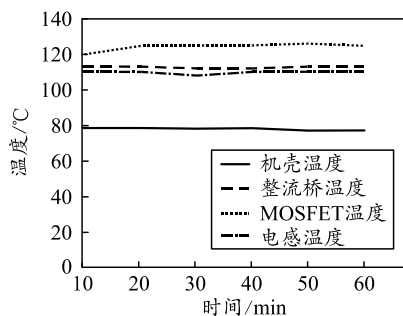


图 4 高温工作温度特性

从实验得到的数据图、表可知：该电源能够输出表示发电机频率的标准方波信号；电源输入电压小于 20 VAC 时输出电压低于 29 V，起到了功率限制的作用，大于 20 VAC 时能够稳定输出 29 V 电压，且负载能力不小于 850 W；电源工作 10 min 后关键器件达到热平衡，在允许的工作温度范围内。由此可知电源设计符合要求，实现了电源功率密度的提升和效率的提高。

4 结论

笔者采用 LTC3789 高性能升降压式开关稳压控制器，从电源电路原理、组成及功率变换电路设计等出发，结合电源高功率密度和高效率的使用要求，设计了一种能在输入电压高于、低于和等于输出电压的条件下均可工作的电源电路。实验结果表明：该电路可在不同工作模式间无缝切换且满足输入频率宽的要求，输出采取同步整流使功率变换器的效率高达 98%，最大程度减小了电源的体积，提高了电源功率密度。

参考文献：

- [1] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 43-73.
- [2] 徐明, 尹斌. 基于 UC3842 的单端反激式开关稳压电源的设计与分析[J]. 河海大学常州分析学报, 2005, 19(3): 45-48.
- [3] 高曾辉, 于相旭. 单端反激式高频高压开关稳压电源[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(5): 29-31.
- [4] HUA G C, FRED C L. Evaluations of Switched-Mode Power Conversion Technologies[C]. Proceedings of IP EMC' 94, Beijing, 1998.
- [5] HUA G C, FRED C L. Soft-Switching Techniques in PWM Converters[J]. IEE Trans. On Industrial Electronics, 1995, 42(6): 189-564.
- [6] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998: 229-292.
- [7] 李序葆, 赵永健. 电力电子器件及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 237-282.