

基于 PWM 的电流源 / 电压源的设计与分析

戚 栋, 王宁会

(大连理工大学电气工程系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于 PWM 技术设计的电流源 / 电压源的电路, 采用固态继电器作为分流器, 可将数安至数百安范围内变化的电流源转换成热耗小、输出电压稳定的电压源。该电源特别适合作为高电压侧测量系统的供电电源。本文对电路的工作原理、关键技术进行了分析, 给出了实验结果。

关键词: PWM; 电流源 / 电压源; 固态继电器; 分流器

中图分类号: TM452 文献标识码: A 文章编号: 1003-353X(2004)01-0060-03

The design and analysis of current/voltage supply based on PWM

QI Dong, WANG Ning-hui

(Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A current/voltage supply is presented based on the technology of PWM. It adopts SSR as the shunt. It can convert the current supply variable from several amperes to several hundred amperes to a voltage supply with low heat rate and stable output voltage. This power supply is especially adapted to be used as the power supply for measure system of a high voltage side. The operating principle of the circuit and the pivotal technology are analogized, the experimental results are also given.

Key words: PWM; current/voltage supply; SSR; shunt

1 引言

在高电压测量系统中,因受某些条件限制,位于高压侧的测量装置往往不能用导线直接从低压侧获得工作电源,这时可采用母线电流供电方式,即利用母线电流作为能量来源,经电磁式电流互感器 CT 和相关电路将变化的电流源变换成具有一定功率输出能力的稳定电压源,为测量装置供电。如:在电力系统颇具应用前景的光纤电流互感器,目前主要采取这种方式供电。由于现场高压母线电流的变化范围很大,而且供电电源与测量装置是在被绝缘材料包围、散热条件很差的环境下工作,所以在这种情况下,如何设计低热耗的电流源 / 电压源(以下简称“电源”),使其稳定工作,已成为要解决的技术难题^[1]。

本文基于 PWM 设计的电源,解决了上述问题。

2 电源电路及工作原理

2.1 电源电路

电源电路如图 1 所示。图中 CT 为电磁式电流

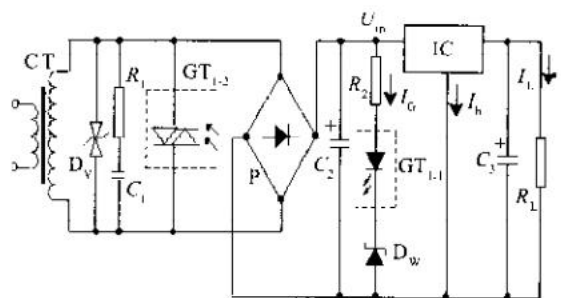


图 1 电源电路

互感器, GT_{1-1} 和 GT_{1-2} 分别为固态继电器 GT_1 的输入端和输出端, IC 为低压差三端集成稳压器, D_w 为稳压二极管, D_v 为瞬间电压抑制二极管, R_1 与 C_1 组成高次谐波吸收电路, R_L 为负载 (即测量装置)。如果负载需要几种电压供电, 则可在 IC 输出端接入相应规格的 DC/DC 模块。

2.2 工作原理

在图 1 中, 根据 GT_1 从断态向通态过渡时的 GT_{1-1} 触发电流 I_{G1} , 维持 GT_1 工作的 GT_{1-1} 维持电流 I_{GH} 和 GT_1 从通态向断态过渡时的 GT_{1-1} 截止电流 I_{G2} 三者之间有 $I_{G2} < I_{GH} < I_{G1}$ 的关系^[2], 以及稳压二极管 D_w 存在一定数值的动态电阻 r ($r = \Delta U / \Delta I \neq 0$) 的特性^[3]; 由于 D_w 支路和 GT_{1-2} 间形成的负反馈作用, 使 GT_{1-2} 的通断时间能够随 CT 次级电流的变化而变化并保持适当比例, 从而保证了 IC 的输入电压 U_{in} 在较小的范围内波动、输入/输出压差合适和输出电压的稳定。

为了便于分析, 设: ① U_{in} 在 $U_1 \sim U_2$ 间波动, U_{in} 由 U_1 上升至 U_2 的时间为 T_1 , 由 U_2 下降至 U_1 的时间为 T_2 ; ② GT_{1-1} 支路的电流为 I_G ; ③ 将 IC 的偏流 I_b 归并到负载电流 I_L 中, 并忽略 I_b 的变化 (I_b 实际变化很小^[4], 不影响以下分析)。

(1) 当 $U_{in} > U_2$ 时, D_w 导通, $I_G > I_{G1}$, 使 GT_1 的输出端 GT_{1-2} 从截止状态变为导通状态。此时由于 GT_{1-2} 通态压降 (1V 左右) 小于 U_{in} , 故 CT 次级电流被 GT_{1-2} 短路, 电容 C_2 开始单独为 GT_{1-1} 支路和负载供电, U_{in} 逐渐下降, 经过时间 T_2 后, $U_{in} = U_1$ 。

根据基本关系式:

$$\Delta Q = C \times \Delta U \quad (1)$$

$$Q = I \times t \quad (2)$$

在这一过程中有如下关系

$$C \times (U_2 - U_1) = (I_L + I_G) \times T_2 \quad (3)$$

C 为 C_2 的电容量。

值得指出: GT_{1-2} 导通时, 由于整流桥 P 中二极管的单向隔离作用, 使电容 C_2 两端电压不受 GT_{1-2} 低通态压降的影响, 所以 GT_{1-2} 不会对 C_2 储存的能量进行分流; I_G 在 U_{in} 由 $U_2 \rightarrow U_1$ 过渡的过程中略有变化, 故式 (3) 中的 I_G 可认为是在这一过程中的平均值。

(2) 当 $U_{in} < U_1$ 时, D_w 截止, $I_G < I_{G2}$, 使 GT_1 的输出端 GT_{1-2} 从导通状态变为截止状态, 此时 CT 次级电流 I (平均电流) 在向 C_2 充电的同时又向负载提供能量, U_{in} 逐渐上升, 经过时间 T_1 后, $U_{in} = U_2$ 。

根据式 (1) 和式 (2), 在这一过程中有如下关系

$$I \times T_1 = C \times (U_2 - U_1) + I_L \times T_1 \quad (4)$$

式 (1)、式 (2) 过程周期往复进行, U_{in} 始终在 $U_1 \sim U_2$ 间变化, 使三端稳压器 IC 始终保持合适的输入/输出压差, 输出电压稳定, 为负载提供稳定的工作电源。

3 技术分析

由式 (3) 和式 (4) 可得

$$T_2 / (T_1 + T_2) = 1 - (I_L + I_G) / (I + I_G) \quad (5)$$

根据图 1 所示电源电路的工作过程, 式 (5) 阐述了以下涵义:

(1) $T_2 / (T_1 + T_2)$ 代表了 GT_1 导通时间与工作周期之比, 它随着电流 I 的增加而增大, 因此, 驱动固态继电器 GT_1 工作的信号实质是一个受控于 CT 次级电流 I 的 PWM (脉宽调制) 信号, PWM 信号的“占空比”与电流 I 的关系由式 (5) 给出;

(2) 在 T_2 期间, GT_{1-2} 导通, 它以较大的等效导纳切入 CT 次级参与分流; 在 T_1 期间, GT_{1-2} 截止, 它的等效导纳近似于零, 不参与分流。若取 GT_{1-2} 导通时的分流能力为 1, 则 $T_2 / (T_1 + T_2)$ 相当于 CT 次级电流为 I 时的 GT_{1-2} 平均分流能力, 它受控于 CT 的次级电流 I 。

这里特别指出: 采用母线电流供电方式的电源, 其适应母线电流的变化范围, 主要取决于能否有效降低电源的热耗。电源的热耗主要来自分流器、整流桥和集成稳压器, 为了有效降低电源的热耗, 在图 1 中采取了以下措施:

(1) 由于 D_w 支路与 GT_{1-2} 间形成的负反馈作用和 C_2 的滤波、储能作用以及整流桥 I 的单向隔离作用, 通过适当选取 C_2 和 D_w 支路的参数, 可控制 GT_{1-2} 的通断时间保持适当比例, 使 IC 的输入/输出压差在合适的范围内变化, 保证 IC 输出电压稳定, 同时热耗较小;

(2) 由于整流桥 I 的交流输入端与分流器 GT_{1-2}

设计与开发

并联, GT_{1-2} 开通时, P 中没有电流流过, 所以可显著降低整流桥的热耗, 若选用低管压降的整流桥, 还可进一步降低整流桥的热耗;

(3) 由于分流器 GT_{1-2} 工作在开关状态(见图 2), 开路时没有热耗, 导通时压降又很低, 所以其热耗比以线性方式工作的分流器的热耗明显减少。因此, 图 1 所示的电源在母线电流变化范围较大的情况下, 热耗较小, 可为测量装置提供稳定的工作电源。

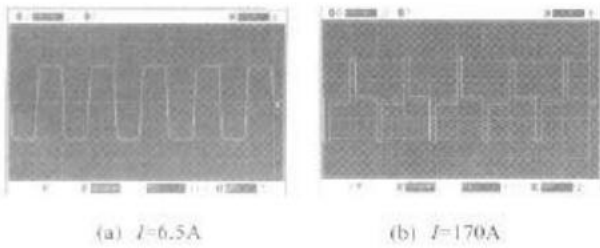


图 2 固态继电器输出端的电压波

设 GT_{1-2} 的平均分流能力为 Y , 则

$$Y = 1 - (I_L + I_G) / (I + I_G) \quad (6)$$

下面结合式 (6) 和图 1 进一步分析电源的技术要点。

(1) 当 $I < I_L$, 则 $Y < 0$, 属于母线电流向电源提供的能量不能满足负荷要求, 母线电流较小的情况。这时, Y 相当于一定容量的发电机或一外部电源, 在本系统中不可能物理实现。在图 1 中表现为: IC 的输入电压 U_{in} 小于其正常工作所需要的最小电压, 电源处于死区, 无法正常工作。为了减小电源死区, 可采取适当增大 CT 铁芯的截面、选择低损耗的铁芯和减少 CT 次级匝数等措施。

(2) 当 $I = I_L$, 则 $Y = 0$, 属于母线电流向电源提供的能量恰好能满足负荷要求, 维持电源正常工作所需最小母线电流的情况。此值越小, 电源死区范围越小, 电源性能越好。在图 1 中表现为: IC 的输入电压 U_{in} 恰好等于其正常工作所需要的最小电压, 电源正常工作, 但这时的 U_{in} 还不足以使 D_w 支路导通, GT_{1-2} 仍处于开路状态。

(3) 当 $I > I_L$, 则 $Y > 0$, 属于母线电流足够大的情况。这时, Y 相当于一个分流支路起分流

作用, 其平均分流能力与 CT 次级电流 I 呈式 (6) 所示的函数关系。在图 1 中表现为, 通过 D_w 支路与 GT_{1-2} 间形成的负反馈作用, 使 GT_{1-2} 的通断时间比随 I 的增加而增大, GT_{1-2} 作为受控阻抗切入 CT 次级分流, 控制 U_{in} 在允许范围内波动, 保证电源工作正常。

(4) 当 $I \gg I_L$, 属于母线出现瞬时故障电流的情况。这时, 在图 1 中, 由于瞬间电压抑制二极管 D_w 和电容 C_2 的储能作用, 限制了 U_{in} 的上升, 仍可保证电源正常工作。

因此, 图 1 所示的电源在母线电流变化范围较大的情况下, 具有热耗小、工作稳定的特点。

4 实验结果

图 2 (a), (b) 给出的实验结果是图 1 中 CT 初级电流分别为 6.5A 和 170A, 负载电流约为 150mA 时, 固态继电器 GT_1 输出端 GT_{1-2} 的电压波形图。将本文设计的电源经绝缘处理后, 现场运行试验和实验室模拟实验的结果表明, 在母线电流从数安至数百安宽范围变化的情况下, 可为负载提供 5V/150mA 的稳定工作电源。如果负载需要几种电压供电, 只需在集成稳压器 IC (见图 1) 的输出端接入相应规格的 DC/DC 模块即可。该电源特别适合作为高电压侧测量装置的供电电源。

参考文献:

- [1] 段雄英, 邹积岩. 一种新型光纤电流互感器的研究 [J]. 高电压技术, 2000, 26 (6): 46.
- [2] (美) 施敏. 半导体器件—物理与工艺 [M]. 王阳元, 嵇光大, 卢文豪译, 北京: 科学出版社, 1992, 81-107.
- [3] 杨荫彪, 穆云市. 特种半导体器件及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1999, 2.
- [4] 陈清山, 陈燕科. 日本美国最新集成稳压器及互换手册 [M]. 湖南: 中南工业大学出版社, 1999, 76.

(收稿日期: 20021125)

作者简介:

戚栋 (1963-), 男, 辽宁大连人, 硕士学位 (在读博士), 副教授, 主要从事功率控制技术及智能仪表研究, 发表论文 40 余篇, 获国家专利 3 项, 教育部科技奖 1 项, 辽宁省科技奖 2 项。