一种直流变换器线损补偿电路的设计

冯小飞，王 强，邹 翔

（中国电子科技集团公司第二十四研究所，重庆 400060）

摘要：介绍了一种用于直流变换器的线损补偿电路的设计方法，详细阐述了电路的工作原理和参数设计过程。该电路结构简单，易于实现，通过电流反馈环可自适应调节不同负载电流下的补偿电压。另外，还对电路进行了仿真和实验验证。

关键词：直流变换器；线损；补偿

Design of a line-loss compensation circuit for DC-DC converter

WANG Qiang, ZOU Xiang

(Sichuan Institute of Solid-State Circuits, China Electronics Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: This paper introduces a design method of a line-loss compensation circuit for DC-DC converter. In this paper, the principle of circuit is described in detail, so as the calculation of parameters. This circuit has a concise composition, and is easy to build up. It is self-adaptable of any load current using current sense to compensate the voltage drop. There are still simulations and experiments appeared in this paper.

Key words: DC-DC converter; line-loss; compensation

0 引言

低压直流供电系统通常为地面、车载、机载和船舶的28 V或48 V用电设备供电，多由成熟可靠的变换器模块组建而成。例如美国的SynQor公司、Vicor公司推出的变换器产品，国内的军陶、宏达等厂家也提供全系列丰富的变换器产品。这些变换器的输出准确度、调整率和效率等指标均达到优良水平，然而在实际应用时依然会面临困境。

例如大功率的通信设备供电应用场合（如T/R组件），供电线上存在20～40 A的电流，而电源到设备的距离可能达到10 m甚至上百米，仅传输线上的损耗压降已经多达10 V。通常的遥测感应端已经不能发挥作用（很多变换器Sense端至多补偿不超过1 V电压）。设备只能寄望于在宽电压范围工作，但势必会造成增加电路复杂度或未工作在最佳状态，且易逼近极限值而引发可靠性问题。

为此本文设计了一种简易的补偿电路，配合具有输出可调功能的直流变换器，可以使抵达用电设备的电压稳定在预设值上。

1 线路损耗补偿电路设计

1.1 线路损耗机理

直流供电系统的线路损耗在不考虑高频特性时，主要指线缆上金属导体的电阻带来的热损耗。利用导线的集总参数和欧姆定律可以方便地计算各种线材和负载条件下的损耗和压降，如下表所示。

表 铜漆包线电阻

Tab. Resistance of copper enameled wire

标称直径/mm	铜导体电阻标称值/(Ω/m)	10 mm 安全工作电流 /A	10 mm 安全工作电流压降/mV
0.1	2.176	0.59	12.84
0.35	0.177 7	7.33	13.02
0.63	0.054 84	23.78	13.04

1.2 补偿电路设计

长距离线路损耗产生的压降可达几伏至几十伏，需要大幅抬拉直流变换器的输出电压才能补偿回初始值，这要求变换器具备大范围调压能力。因此不具备调压功能的电源不在本文讨论范围。

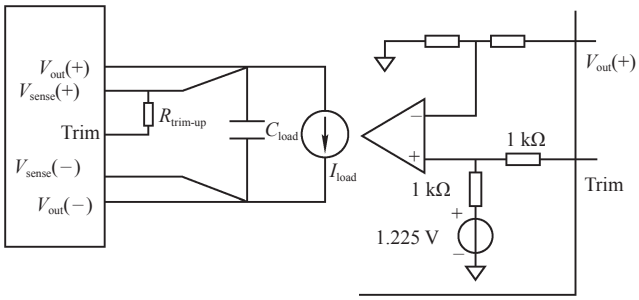


图 1 直流变换器的Trim调压原理

Fig. 1 Trim voltage regulation principle of DC / DC converter

大部分可调输出电压的直流变换器都是采用如图1所示的原理实现调压功能的。以SynQor公司的MCOTS系列直流变换器为例，通过在Trim端接上拉电阻$R_{Trim-up}$到输出正端，内部1.225 V基准经$R_{Trim-up}$和内部的1 kΩ（不同变换器该阻值可能不同）电阻分压，得到新基准电压（>1.225 V），接入到误差放大器正端，由变换器的内部环路控制得到升高后的输出电压。基于图1原理可得如下方程组

$$1.225K=V_{nominal} \tag{1}$$

$$KV_{ref}=V_{desired} \tag{2}$$

$$\frac{V_{ref}-1.225}{R}=\frac{V_{desired}-1.225}{2R+R_{Trim-up}} \tag{3}$$

式中，K为输出电压采样比例；V_{ref}为误差放大器正端电压；$V_{nominal}$为未调压时输出电压；$V_{desired}$为调压后输出电压；R为基准分压电阻（图1中的1 kΩ电阻）；$R_{Trim-up}$为外部上拉电阻。

由式（1）～式（3）可得

$$R_{Trim-up}=\frac{(\frac{V_{nominal}}{1.225}-2)V_{desired}+V_{nominal}}{V_{desired}-V_{nominal}}R \tag{4}$$

通过式（4）可以计算出利用上拉电阻方式调压时上拉电阻的取值。不过，电阻调压方式欠缺灵活性，采用外置电压的方式则更为便捷，易于实现实时调压。

采用Trim端外置电压的方式调压则有

$$\frac{V_{ref}-1.225}{R}=\frac{V_{Trim}-1.225}{2R} \tag{5}$$

式中，V_{Trim}为Trim端电压。

由式（1）、式（2）和式（5）可推导出

$$V_{Trim}=(\frac{2V_{desired}}{V_{nominal}}-1)\times 1.225 \tag{6}$$

基于以上调压原理，线损补偿电路的设计思路为：检测线路电流→计算Trim端调整电压→变换器调整输出电压。

图2为线损补偿的电路原理图。输出电流通过R_S采样后经放大与V_R相乘再与V_{set}相加得到正确的调整电压，接入DC/DC变换器的Trim端，实现输出电压抬升，使负载端的电压$V_O'=V_{desired}$。当补偿电压与线损压降吻合时，即$V_O=V_{desired}+I_OR_{line}$，式（6）演变为

$$V_{Trim}=[\frac{2(V_{desired}+I_OR_{line})}{V_{nominal}}-1]\times 1.225 \tag{7}$$

由图2可知，Trim端电压等于$I_OR_SV_R+V_{set}$。

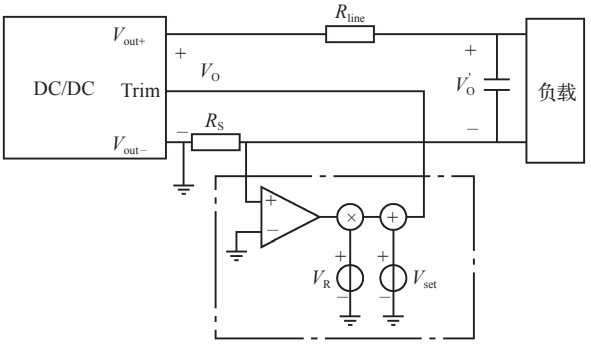


图 2 线损补偿电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of line loss compensation circuit

$$V_{\mathrm{R}}=\frac{2.45R_{\mathrm{line}}}{V_{\mathrm{nominal}}R_{\mathrm{S}}} \tag{8}$$

$$V_{\mathrm{set}}=\left(\frac{2V_{\mathrm{desired}}}{V_{\mathrm{nominal}}}-1\right)\times 1.225 \tag{9}$$

当满足式（8）、式（9）的条件时，补偿电路即可完全补偿线损压降。式（8）、式（9）中的参数均为硬件固定值，系统搭建完成后即可确定，因此计算出的V_{R}和V_{set}为常数。又因参数中不包含I_0，因此无论I_{O}如何变化都能得到相应的补偿。

1.3 补偿电路的实现

如图3所示，利用单片机可以方便地实现补偿电路。采用单片机内置的A-D端口可以采样R_{S}上的电压；利用程序可以计算出所需的V_{R}和V_{set}；通过程序实现乘加运算；最终利用DAC输出调制电压V_{Trim}。但是这种方法的缺点是其乘加需要经过程序运算，补偿电路的响应周期与程序复杂度相关，延迟不可避免。

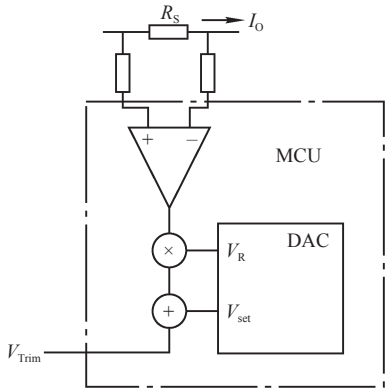


图 3 利用单片机实现的补偿电路

Fig. 3 Compensation circuit realized by single chip microcomputer

相对于全数字方案，利用模拟元件配合单片机可以实现更快的响应速度。采用ADI公司的AD835（SOP8封装）即可实现差分输入、乘和加全部功能，其内部框图如图4所示。

图5为运用AD835搭建的补偿电路。甚至于AD835可直接连接两个预设好的模拟基准电压源而完全摆脱数字电路，极大地简化了电路的实现。当然，这会牺牲不同设备适配的便利性。

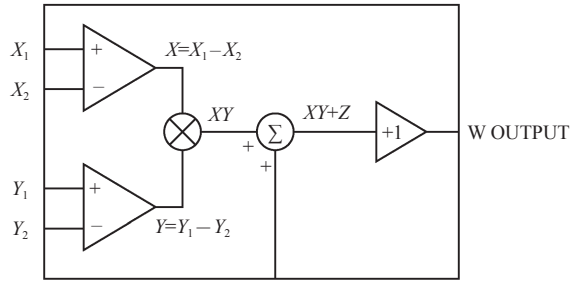


图 4 AD835原理框图

Fig. 4 AD835 principle block diagram

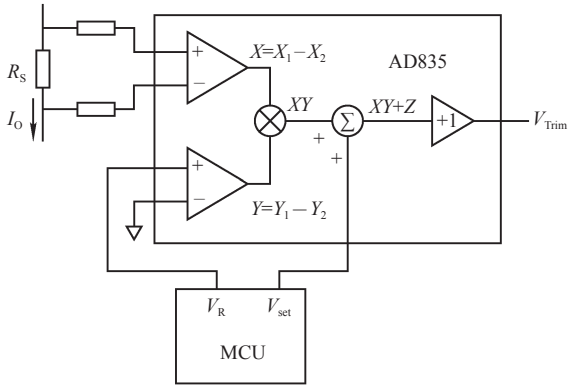


图 5 采用AD835的补偿电路

Fig. 5 Compensation circuit using AD835

2 电路仿真与实验

2.1 仿真

采用PSIM软件对补偿电路进行仿真，条件如下：V_{in}=28 V，V_{nominal}=50 V，V_{desired}=30 V；R_{line}=2 Ω，R_{S}=0.2 Ω；I_{O}=0.3 A→4 A→2 A。

根据以上条件可计算出：V_{R}=0.49 V；V_{set}=0.245 V。

仿真电路按图2电路原理布置，输出波形如图6所示。

由仿真波形可见，在不同的负载电流条件下，负载端电压V_{O}'始终能稳定在30 V不变，而变换器输出端电压V_{O}则被拉高，I_{O}=2 A时V_{O}=34 V，I_{O}=4 A时V_{O}=38 V。

2.2 实验验证

采用AD835ARZ乘法器及两个电压源搭建线损补偿电路，电路图如图7所示。直流变换器选择的是SynQor公司的1/4砖模块电源MCOTS-C-28-50-QE-N-M，额定输入28 V、额定输出

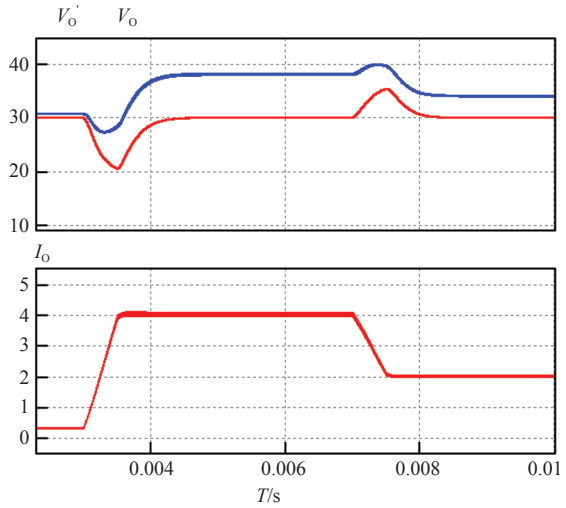


图 6 仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform

50 V，可调电压范围为25～55 V。输出线上串联2 Ω电阻替代长线缆的等效电阻。采样电阻选择0.1 Ω。电路期望得到负载端电压为30 V，因此按照式（8）、式（9）计算可得V_R=0.98 V，V_{set}=0.245 V。按此计算结果设置两个电压源的输出电压。变换器输入由28 V电源供电，输出接电子负载方便调节（负载在空载和4 A之间来回切换），乘法器供电由独立的5 V电源提供。

图8为实测的输出电压波形。图8a为负载端电压波形，可以看到在空载、4 A之间来回切换时，输出电压均能稳定在30 V左右。图8b为靠近变换器输出端的电压波形，在负载从0 A跃变到4 A时，变换器输出电压迅速升高约8 V左右，以

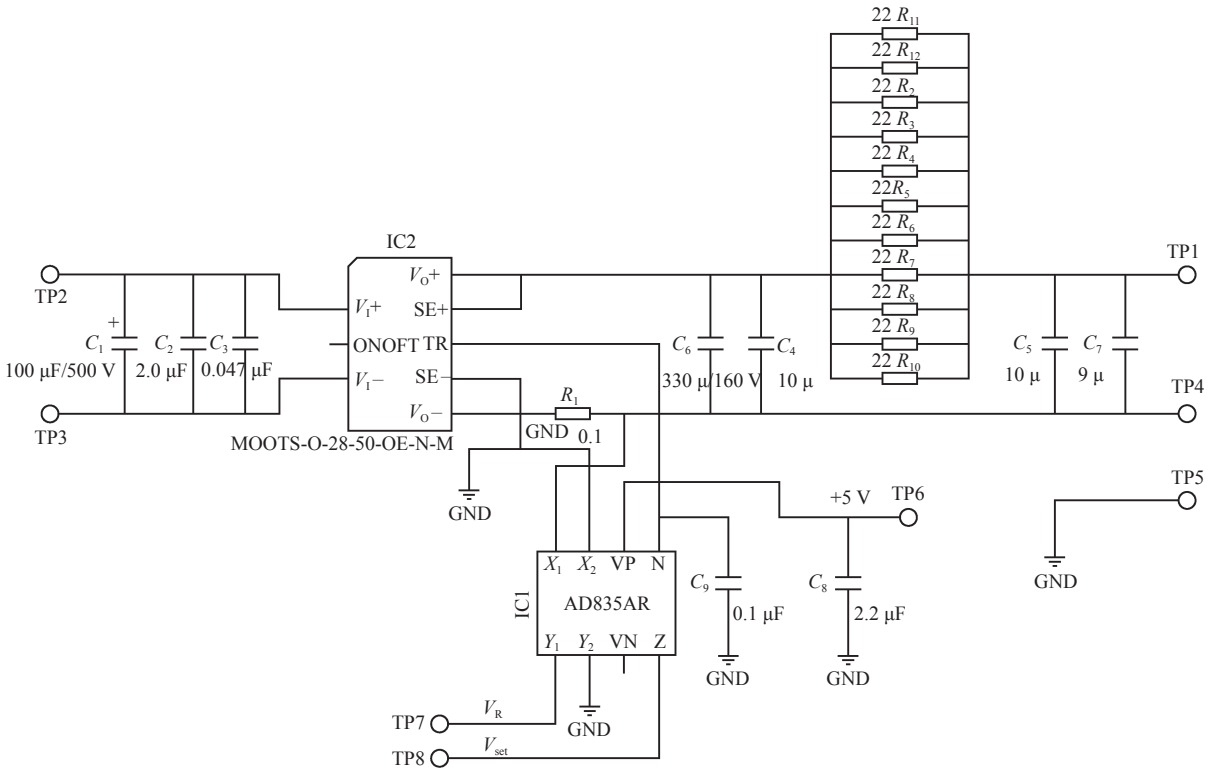


图 7 实验电路线路图

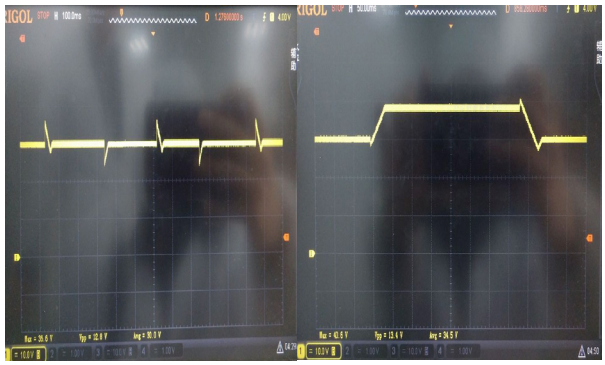
Fig. 7 Test circuit diagram

补偿2 Ω电阻上的压降。实验结果与仿真结果相当，与计算结果吻合，证明补偿电路设计的正确性和可用性。

不过，由图8a可知，在切换过程中电压存在较大的跌落和过冲，这点线损补偿电路本身并不能解决，需要变换器具有较快的动态响应或是在负载端设置较大的储能电容才能将其减小。

3 结束语

工程上低压直流电源遇到供电线缆较长的情



(a) 负载端电压波形　　(b)靠近变换器输出端的电压波形

图 8　实测输出电压波形

Fig. 8 Measured output voltage waveform

况，造成线缆损耗压降过大，使得用电设备不能正常工作，或处于不佳的工作状态。本文设计了一种线损补偿电路，专门针对具备可调输出功能变换器的直流电源。电路简单有效，线路计算与原理分析准确，并通过仿真和实验验证了方案的正确性。不过电路在负载跳变时会出现明显的过冲或跌落，需要更进一步的研究来加以解决。

参考文献

[1] SANJAYA MANIKTALA.精通开关电源设计[M]. 王志强，等译. 北京：人民邮电出版社，2012.

[2] 李文龙. DC-DC变换技术的现状及未来[J]. 国际电子变压器，2006(7)：113-119.

[3] 孙东. 一种基于负反馈原理的电压补偿方法与电路实现[J]. 电子器件，2007(6)：62-64，68.

作者简介

冯小飞

冯小飞（1980－），男，工程师，从事开关电源的研究工作。

(收稿日期：2020－6－14)EA

典藏技术　革新应用

专业专注

时刻关注并推动中国电气技术的发展

《电气应用》是一本拥有光荣发展历程的全国优秀科技期刊。

自1982年创刊至今，已走过三十多年艰苦创业、改革发展的光辉历程。其所荣获的“全国优秀期刊、中国期刊方阵‘双奖期刊’和国家期刊奖‘百种重点期刊’、中文核心期刊”等诸多荣誉见证了编辑们的专业与勤奋，也博得了广大读者和业内专家的支持与厚爱，在众多电工类专业技术期刊中颇具影响力。

国内统一刊号：CN11－5249/TM　国际标准刊号：ISSN1672－9560　国内邮发代号：82－341　国外发行代号：M1409