

新型高效率低成本煤矿井下本安直流电源电路的研制

彭继国 杨木易 王金满 张华 刘腾

煤矿井下使用的直流电源装置具有较特殊的使用需求与安全要求，目前随着煤矿智能化的发展，大量LED照明灯具、井下服务器交换机路由器的使用，使得井下直流电源设备的应用量大幅增加，现有技术的井下本安电源存在的不足也日益凸显。一方面，由于井下潮湿闷热环境，以及防爆结构的密封性，电源散热困难导致温度升高。此外，直流电源不可或缺的电解电容的寿命短板，导致寿命可靠性指标难以提升；另一方面是本安电源特殊的短路防护要求，由于依赖高采样速度的短路检测电路，导致电源成本昂贵，结构复杂。综上所述，研发新型本安电源电路意义重大。

现有本安电源问题分析

寿命短、故障率高

开关电源设备作为成熟的电源系统，寿命可靠性局限已经破除，然而井下的高温条件，以及防爆设备的密闭散热困难特点，使得电源系统中不可或缺的元件，如电解电容的寿命大幅降低，从而导致电源寿命不足，故障率高。

电源设备，包括开关电源、电子镇流器、变频器等，无一不是通过内部开关管不停开关、利用PWM斩波原理来调节、变换功率，一般开关频率要达到30 kHz以上，才能有较小的体积和较高的效率。电解电容高频损耗很大，在高频电流作用下会发热，以致老化干枯，然而电解电容不会突然损坏，而是逐步老化，导致电源模块的滤波效果逐年降低、输出的纹波会逐年增大。当纹波增大到一定幅度时，必然会对所供电设备的运行产生明显影响，最终导

致设备故障，高频环境下工作的电解电容，一般温升很难降到不影响寿命的程度，由于现有井下本安电源工作环境恶劣，电源内部温度常常达到70℃以上，通常电解电容产生30℃以上温升非常普遍，对于耐温105℃的电解电容，寿命仅1万h。

异常保护电路价格高

煤矿井下使用的本安型电源，对于自身的故障容错能力要求较高，要求输出端在发生短路条件下也不能产生火花，现有技术都通过采样速度较高的模拟量采样电路，采集输出端电流，发现短路迹象后快速关闭输出实现保护；由于该技术依赖高速采样，需要使用进口芯片，其成本较高，一个1 A额定电流的保护模块价格也在70元以上，很大程度上增加了电源采购成本，通过B级防护要求的电源也至少需要2组保护模块串联，这样一个电源保护模块的成本需要140元，电源整机成本常常在15元/W以上，对煤矿企业是较大的负担。

电压波动适应能力差

井下供电系统常常采用127 V，因电压低线损大，有时供电电压仅60~70 V，大部分开关电源产品无法在如此低压下运行，为了能够适应低电压的工作环境，电源中DC-DC变换器的变压器、主控芯片等须大幅改进，导致成本增加。

新型本安电源电路设计

电源电路结构

笔者通过新型分相整流电路实现无电解电容，从而提高电源设备高温环境的运行可靠性；通过短

路并联分流法限制短路火花能量,克服快速短路检测芯片的高昂成本。新型本安电源电路如图1所示。

整个电路包括DC-DC降压转换电路、整流滤波电路、异常保护电路,整流滤波电路由移相电容、移相电感、三相整流桥、滤波电容组成,三相整流桥的其中一相交流输入端与矿用本安电源的交流N相输入端连接,电源的交流L相输入端分成2路,一路与移相电容串联后与三相整流桥的另一相交流输入端连接,另一路与移相电感串联后与三相整流桥的最后一相交流输入端连接。移相电容的容抗值是移相电感感抗值的50%~80%。这一新型分相整流电路,将一相电压通过LC元件分相,形成滞后与超前的两相电压,通过三相整流桥整流后,就可形成以 $\pi/4$ 为周期的脉动直流波,由于该直流电压无过零点,纹波含量较单相整流低得多,因此直流侧仅需要很小容量的薄膜电容滤波即可,巧妙地避免了电解电容的使用,对于电源低压侧,则可使用固态电容解决,实现无电解电容的电源系统,也就克服了电源寿命的短板。

异常保护电路由快速晶闸管、低温可燃气体传感器、限流电感、续流二极管、耦合变压器、压敏电阻组成,低温可燃气体传感器串联于DC-DC降压转换电路的直流输出端正极与快速晶闸管的门极之间,快速晶闸管的正极与负极分别与电源的直流输出端正负极并联,耦合变压器为单绕组三抽头结构,第一与第二抽头分别与快速晶闸管的正极与负极并联,第三抽头与压敏电阻串联后接快速晶闸管的门

极,限流电感与续流二极管并联后与电源的直流输出端串联。笔者提出利用耦合变压器,检测到输出端有任何电压跌落的扰动后,触发晶闸管导通短路输出端,消除外部短路点的火花隐患,晶闸管短路后电源的输出保护电路再行关闭输出,由于耦合电感的快速响应性,该保护电路虽然结构简单,效果却极为突出,液压支架照明灯具在兖矿能源集团股份有限公司设备管理中心煤矿智能开采试验中心现场应用效果,如图2所示。

电源电路特点分析

(1) 异常保护电路分析

本安电源系统的短路异常保护,是本安电源的技术核心,现有技术采用快速关断输出的办法来实现短路快速保护,但这就需要使用价格较为高昂的模拟量检测芯片。笔者突破常规思路,采用短路分流,而不是快速切断短路的常规思路,克服快速短路检测所不可或缺的高价芯片导致的高额成本,利用简单可靠的无源耦合变压器,检测输出端的电压波动,当短路发生前期电压降低时,其波动的电压信号已通过副边线圈传递至快速晶闸管,快速晶闸管可在10 ms内触发导通,将短路能量吸收,避免外部短路发生火花,起到本质安全的异常保护效果,由于变压器1次绕组、2次绕组的感应电动势同时产生,整个电路可在10 ms内启动保护,比起芯片检测再启动保护的现有技术,速度更快,而成本仅有几元钱,大幅降低了本安异常保护电路的成本和进

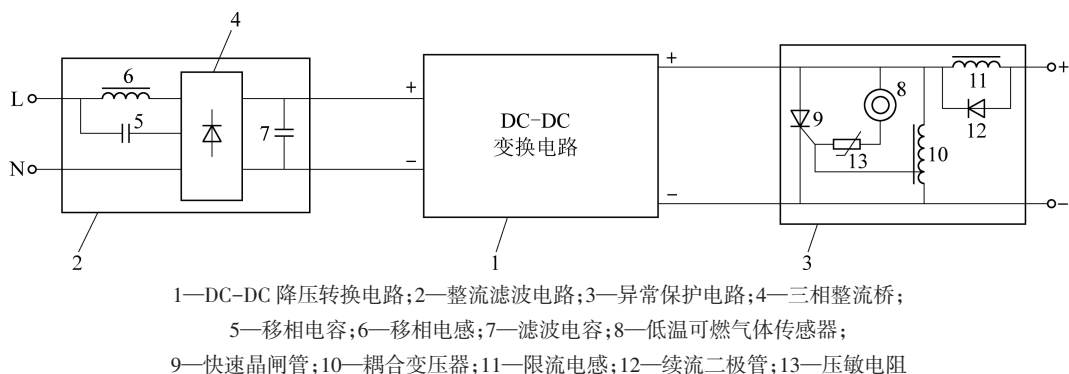


图1 新型本安电源电路



图2 液压支架照明灯具现场应用效果

口芯片供货不稳的问题。此外，现有技术的本安电源，仅考虑故障后不产生火花，不考虑防爆箱内部是否存在危险的本质，即是否有可燃气体进入，因此都是被动的安全防护。利用低温型可燃气体传感器与快速晶闸管连接，当电路检测到内部有可燃气体时，自动触发晶闸管导通关闭电源，既提醒了作业人员，也可在第一时间实现主动防护与主动安全。

(2) 整流滤波电路分析

整流滤波电路，采用单相电流，利用电感与电容移相，借助三相整流桥，建立单相分相整流，使得整流桥直流侧的纹波幅值大幅降低，因此滤波电容的容值可以大幅降低，免去电解电容的使用，转而使用可靠性高的薄膜电容，克服了电解电容的寿命短板，使电源寿命可靠性大幅提升。

对于如何适应矿井波动较大，尤其是常常电压偏低的问题，不是从电源自身层面改动来适应井下供电电压的不稳定，而是利用分相整流的特殊电路创新，通过使电容器容量略大于电感，将整个电源设计为容性负载，利用容性负载的自身感性无功出力，补偿供电网络的无功，从而稳定供电网络电压，

不但使自身免遭低电压的危害，还进一步稳定了井下供电电网的电压，降低了电网损耗、电网线损，产生间接节能效益。此外，功率因数是随着供电电压变化而变化的，电压高时电流小，移相电感感抗较大，电路感性无功出力不多，但供电电压下降后，电源输入电流增加，移相电感饱和电感量降低，电路感性无功出力增加，实现电网低电压时的动态无功支撑，使本电源成为一个智能化动态无功补偿器，很大程度上提升了电网运行的经济性。

电源壳体结构及散热设计要点

笔者提出的新型电源电路，由于其前级整流滤波电路采用了创新的分相整流电路，避免电解电容的使用，采用薄膜电容代替电解电容，而薄膜电容的损耗仅为电解电容的几十分之一，因此一般开关电源难以克服的电解电容发热难题，得到了很好解决，分相整流电路设计为容性，可通过无功补偿的原理提升供电网电压，电压越高，开关电源的开关管电流越小、相应发热损耗越低。

基于上述分析，笔者提出的电源电路的散热与壳体设计就尤为简单，有利于电源的小型化，并且与智能井下设备、照明设备一体化，避免了多重外壳的防爆检测成本与安装麻烦。

电路试验分析

电源直流侧纹波测试

在同样纹波幅值条件下，比较滤波电容器所需容量的大小，可验证分相整流电路的效果，通过采用一个输入交流85~365 V，输出直流18 W、12 V本安电源，通过前级设置分相整流电路，比较了与原先电解电容滤波的效果差异，分相电容为3.3 μF ，分相电感为5 H，通过不同负载与不同电源电压下电源高压直流母线纹波系数的比较，验证分相整流可行性。试验结果分别见表1、表2、表3。

从数据可知，分相整流电路由于分相叠加效果，当负载增大后，分相效果增加，分相电压叠加效果

表1 无分相整流电路即有电解电容(68 μF)滤波时的纹波系数

负载率/电源电压	80 V	127 V	220 V
30%	8.9%	6.9%	2.8%
60%	16%	12.2%	5%
100%	23%	17%	7%

表2 分相整流,薄膜电容(15 μF)滤波时的纹波系数

负载率/电源电压	80 V	127 V	220 V
30%	15%	14%	13%
60%	17%	16%	14%
100%	20%	18%	16%

表3 分相整流,薄膜电容(10 μF)滤波时的纹波系数

负载率/电源电压	80 V	127 V	220 V
30%	19%	16%	15%
60%	23%	20%	16%
100%	24%	21%	18%

表4 交流侧功率因数

负载率/电源电压	50%			100%		
	70 V	100 V	150 V	70 V	100 V	150 V
现有技术电源电路	0.53	0.48	0.41	0.58	0.52	0.43
分相电源电路	0.66	0.71	0.74	0.65	0.72	0.76

表5 交流侧无功功率

负载率/电源电压	50%			100%		
	70 V	100 V	150 V	70 V	100 V	150 V
现有技术电源电路	0	0	0	0	0	0
分相电源电路	+6 Var	+4 Var	+2 Var	+11 Var	+8 Var	+4 Var

表6 短路能量测试

测试次数	第1次	第2次	第3次
短路能量/μJ	150	165	159
动过时间/μS	6	7	6

抵消了滤波电容容量较小带来的纹波增加,因此采用分相整流后,虽然小负载下纹波偏大,但大负载纹波增加不明显,一般电源均考虑最大纹波数值,与原有电解电容滤波的纹波数值相当即可,从表中数据可知,用10 μF的薄膜电容,可代替原有68 μF的电解电容,得到近似的滤波效果,验证了电路可

避免使用电解电容的能力。

电源功率因数测试

通过分相整流电路的设计,可方便地通过调整LC元件电抗值比例,来实现电路的容性或感性,由于开关电源本身的恒功率特性,当供电电压降低时原边电流增加,电感与电容元件的无功交换量增加,如果分相整流电路设计为电容元件容量大,可实现电源电压降低后感性无功出力增加,形成自发无功补偿效果,对电网实现无功支撑,另外由于分相整流电路大幅降低了滤波电容的容量,其交流侧波形畸变大幅降低,谐波含量减少,也间接提升了功率因数。笔者电路与现有同类本安电源电路的交流侧功率因数与无功交换分别见表4、表5。

异常保护电路测试

通过标准火花能量测试的方法,验证样机的短路保护能力,其中晶闸管使用TLC336A型,变压器采用坡莫合金音频变压器,测试了短路保护的动作时限与短路能量(表6),验证了异常保护电路具备较灵敏的短路保护作用。

结 语

笔者基于现有煤矿本安电源的问题,通过新型分相整流电路实现无电解电容,从而提高电源设备高温环境的运行可靠性;通过短路并联分流法限制短路火花能量,克服快速短路检测芯片的高昂成本。其性能可靠、使用方便,具有较好的推广价值。

■ 责任编辑:李艾稣

作者简介:

第一作者:彭继国,高级工程师,现任北斗天地股份有限公司副总经理、安全总监。

E-mail: pengjiguo@bdt.com。

作者单位:北斗天地股份有限公司