

# 电容储能的自动化终端备用开关电源设计

程红丽, 王立, 刘健, 王利强

(西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了在失电情况下继续维持智能终端设备短暂工作, 提出了一种基于电容储能的自动化终端备用开关电源解决方案。论述了电路组成、下限工作电压选取和储能电容器容量设计方法。根据能量平衡关系, 分析了负载突然增大和负载突然减轻情况下的最严重电压凹陷和电压骤升, 并得出输出滤波电容容量的设计考虑。以一个具体的电容储能 FTU 电源为例, 详细说明了电路参数的设计方法, 并进行了实验研究。实验结果表明所设计的电容储能备用电源能够满足在失去正常供电电源后自动化终端待机、操作和通信的需要, 并且所进行的理论分析与实际情况相符。

**关键词:** 电容储能; 开关电源; 后备电源; 自动化终端

## Design of a capacitor energy storage based back-up switching supply for automation terminal units

CHENG Hong-li, WANG Li, LIU Jian, WANG Li-qiang

(School of Communication & Information Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A super-capacitor energy storage based back-up switching power supply is suggested to maintain the intelligent terminal units working for a certain period in case of outage. The circuit structure, the selection of the minimum working voltage of the converter and the design considerations of the capacitance of the energy storage capacitor are discussed. Based on the energy balance principle, the lowest output voltage drop and the highest output voltage rise in case of the output current suddenly changing are analyzed, respectively. The design considerations of the output filter capacitor are given. A capacitor energy storage based back-up supply is used as the example to show the design steps. Experiments are made on the supply, the results of which show that it can meet the requirements of normal working, communication and control, and that the analysis results are in positive to the experiment results.

This work is supported by Program for New Century Excellent Talents in University(No.CET050875).

**Key words:** capacitor based energy storage; switching supply; back-up supply; terminal units for automation

中图分类号: TM727.2; TM764 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0116-05

## 0 引言

在电力系统监测、监控和自动化系统中, 开关电源是智能终端设备的关键部件之一, 其输入一般来自电压互感器二次侧或配电变压器二次侧。但是在故障或其它因各种原因导致输入电源失去的情况下, 这些智能终端设备还必须维持工作一段时间, 否则就不能完成故障检测、处理和继电保护以及信息记录和上报功能, 因此需要采取储能措施。

在变电站内的智能终端设备, 可以采用蓄电池储能构成备用电源系统。但是安装在户外环网柜、柱上开关、配电变压器等的智能终端设备, 需要在恶劣的环境下工作, 采用蓄电池无论对于设备可靠性或维护方便性而言都是不理想的。

实际上对于绝大多数户外智能终端设备, 在失去电源时仅需要维持短暂的工作时间即可<sup>[1]</sup>, 比如: 对于配电变压器监测终端(TTU), 只需在停电时报该信息即可; 对于柱上开关监控终端(FTU), 只需在失电时报故障信息和开关状态, 有必要的时分断该开关即可; 对于环网柜监控终端, 只需在失电时报故障信息和开关状态, 并将故障线路上游相邻开关分断即可。上述功能所需要的时间一般在1 min之内。由于分断开关所需的能量可以由专门的工作储能电容器提供, 因此在故障或者失电时, 智能终端设备的电源只需要提供维持本机工作和通信单元所需要的能量即可, 峰值功率一般不会超过5 W, 平均功率小于2.5 W。

随着科学技术的发展, 超级电容器和大容量电解电容器技术已经日趋成熟。与蓄电池相比, 电容器具有充电速度快且管理方便、寿命长、体积小、

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET050875)

重量轻等诸多优点, 是一种很有发展前景的电力储能设备并且已经成功地应用在电力系统中<sup>[2-4]</sup>。

从户外智能终端设备在失电后需要一段短暂的平均功率较小的维持电源供应需求看, 采用超级电容器和大容量电解电容器作为储能手段是完全可行并且较蓄电池而言更加合适<sup>[5]</sup>。

本文论述一种采用电容储能的备用开关电源分析和设计方法, 并对其性能进行实验验证。

## 1 电路组成

电容储能开关电源由整流电路、切换电路、DC-DC 变换器、工作储能电容器和操作储能电容器等部分组成, 其结构如图 1 所示。对于 TTU 等不需要控制的情形, 可仅有虚线下方部分。

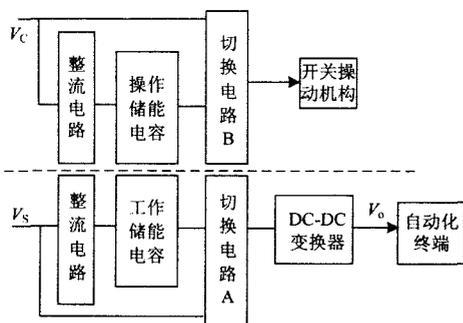


图 1 电容储能开关电源的组成

Fig.1 Circuit structure

整流电路用以在正常供电情况下为电容充电, 切换电路 A 用以在失去正常供电时将 DC-DC 变换器切换到工作储能电容上, 当恢复正常供电时再将其切换回来。切换电路 B 用以在失去正常供电时将开关操纵机构切换到操作储能电容上, 当恢复正常供电时再将其切换回来。工作储能电容器用以储存能量, 在失去交流电源时维持开关电源作为智能终端供电。操作储能电容器用以储存能量, 在失去交流电源时满足开关操作的需要。DC-DC 变换器用以将交流电源和工作储能电容器中的能量转换成所要求的形式以供智能终端设备使用。一般输入电压都高于自动化装置的工作电压, 因此常采用降压型 buck DC-DC 变换器<sup>[6]</sup>, 其组成如图 2 所示。

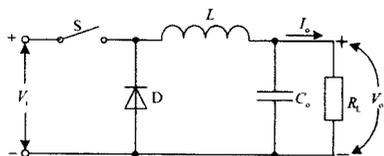


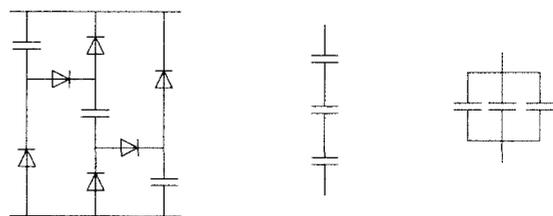
图 2 buck DC-DC 变换器

Fig.2 A buck DC-DC converter

图中 S 为功率开关, D 为二极管, L 为电感, Co 为输出电容, RL 为负载。Vi 为输入电压, Vo 和 Io 分别为输出电压和输出电流。

正常时的工作电源 Vs 和操作电源 Vc 有时相同有时并不相同。正常时的操作电源 Vc 一般直接取自电压互感器二次侧, 因此为 AC 220 V (整流后为 DC 310 V) 或 AC 100 V (整流后为 DC 141 V); 而正常时的工作电源 Vs 有时也直接取自电压互感器二次侧, 有时则采用一个二次变压器兼隔离装置进一步降压后得到。

对于输入输出电压相差很悬殊的情形, DC-DC 变换器一般需要采用脉冲隔离变压器来满足电压变比的要求。还可以采用如图 3 所示的串并电容组合结构 (SP)<sup>[7,8]</sup> 构成工作储能电容器, 它具有串联充电和并联放电的特性, 因此在失去交流电源而由工作储能电容器放电维持工作期间, 串并电容组合结构实际上起到了降压的作用。通过选取恰当阶数的串并电容组合结构, 就有可能在 DC-DC 变换器中不需要采用隔离变压器也能满足电压变比的要求。



(a)3阶SP电容组

(b)充电等效电路

(c)放电等效电路

图 3 串并电容组合结构及其充放电等效电路

Fig.3 Series-parallel capacitor group and its equivalent circuit

图 1 虚线上部的设计和应用已经比较成熟<sup>[9]</sup>, 操作储能电容器电压和容量的设计需要根据开关操作机构的特点和所需要的能量确定, 本文不再赘述, 下面着重论述虚线下面部分的分析与设计考虑。

## 2 参数设计

### 2.1 变换器的下限工作电压

电容储存的能量 W 取决于其容量 C 与充电电压 (即输入电压) U, 即

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

考虑后级 DC-DC 变换器的下限工作电压, 假设当工作储能电容器的电压下降到  $U_{\min}$  后 DC-DC 变换器就不能正常工作, 由此造成的不可利用的剩余储能称为“残能”, 用  $W_s$  表示, 即

$$W_s = \frac{1}{2} C U_{\min}^2 \quad (2)$$

则可利用能量  $W_a$  为

$$W_a = W - W_s = \frac{1}{2} C (U^2 - U_{\min}^2) \quad (3)$$

对应的能量利用率  $\gamma_A$  为

$$\gamma_A = \frac{W_a}{W} = 1 - \frac{U_{\min}^2}{U^2} \quad (4)$$

$\gamma_A$  与  $U_{\min}$  的关系如表 1 所示。

表 1  $\gamma_A$  与  $U_{\min}$  的关系  
Tab.1 Relationship between  $\gamma_A$  and  $U_{\min}$

$\gamma_A$	60%	70%	80%	88.9%	93.8%	98%
$U_{\min}$	0.63U	0.55U	0.45U	0.33U	0.25U	0.14U

由表 1 可见,  $\gamma_A$  并不随着  $U_{\min}$  下降而线性增加, 当  $U_{\min}$  下降到一定程度后,  $\gamma_A$  的增加很平缓。因此没有必要将  $U_{\min}$  设计的太低, 因为  $U_{\min}$  越小, 开关变换器的输入电压范围越宽, 制作难度也越大, 但是当  $U_{\min}$  低到一定程度时, 对于储能利用率的改善作用已经很小。一般可以取  $U_{\min}=0.25U$ , 对应储能利用率  $\gamma_A=93.75\%$ ; 或  $U_{\min}=0.33U$ , 对应储能利用率  $\gamma_A=88.89\%$ 。

## 2.2 工作储能电容器容量设计

设开关变换器的转换效率为  $\eta$ , 则自动化装置可以从工作储能电容器得到的能量  $W_A$  为:

$$W_A = W \gamma_A \eta \quad (5)$$

设自动化装置的供电电压为  $V_E$ , 待机工作电流为  $I_0$ , 待机时间要求为  $T_0$ , 则所需要能量  $W_0$  为

$$W_0 = V_E I_0 T_0 \quad (6)$$

设要求自动化装置在失去交流电源条件下对继电器进行  $m$  次控制, 对继电器控制时的工作电流达到  $I_C$ , 持续时间为  $T_C$ , 则所需要能量  $W_C$  为

$$W_C = m V_E I_C T_C \quad (7)$$

设要求自动化装置在失去交流电源条件下进行  $h$  次数据通信, 发信期间的工作电流达到  $I_T$ , 持续时间为  $T_T$ , 则所需要能量  $W_T$  为

$$W_T = h V_E I_T T_T \quad (8)$$

则该自动化装置在失去交流电源期间所需要的总能量  $W_L$  为

$$W_L = W_0 + W_C + W_T \quad (9)$$

为了满足上述要求, 必须

$$W_A > W_L \quad (10)$$

则工作储能电容器的容量必须满足

$$C > \frac{2W_L}{U^2 \gamma_A \eta} \quad (11)$$

## 2.3 输出电容器容量设计

根据 2.1 节, 可以确定 buck DC-DC 变换器的输入电压  $V_i$  的变化范围为:

$$V_i \in [U_{\min}, U] \quad (12)$$

根据 2.2 节, 可以确定 buck DC-DC 变换器的负载电流  $I_o$  的变化范围为:

$$I_o \in [I_0, \max(I_C, I_T)] \quad (13)$$

设自动化装置能够可靠运行 (不因电压骤升和凹陷而导致数字逻辑错误、程序异常或元器件烧毁) 的工作电压范围为  $[V_{o,\min}, V_{o,\max}]$ 。

电压骤升和凹陷都是由于变换器对于电压或负载突变的动态响应过程造成的, 但对于电容储能备用电源, 其输入电压为电容电压不会突变, 因此电压骤升和凹陷主要由于负载突变引起。

### 1) 电压凹陷

电压凹陷发生在负载突然增大时, 最严重情况是由最轻负载突变到最重负载电流的情形。考虑到变换器在最轻负载条件下有可能处于不连续导电模式 (DCM), 因此电感电流为 0 时突变到最大负载电流是最坏情形。在过渡过程中, 功率开关 S 的导通达到其上限, 近似认为其是完全导通的, 则电感电流需要从 0 逐渐增长到  $I_{o,\max}$ , 近似认为输出电压保持  $V_E$ , 则电感电流上升速率为<sup>[6]</sup>

$$k_i = \frac{di_L}{dt} = \frac{V_i - V_E}{L} \quad (14)$$

当输入电压为其下限时, 电感电流增速最慢, 即

$$k_{i,\min} = \frac{U_{\min} - V_E}{L} \quad (15)$$

电感电流到达  $I_{o,\max}$  所需要的时间  $\Delta t$  为

$$\Delta t = I_{o,\max} / k_{i,\min} = \frac{I_{o,\max} L}{V_{i,\min} - V_E} \quad (16)$$

实际上在电感电流到达  $I_{o,\max}$  之前, 输出电压一直都在缓慢下降, 因此实际的电感电流增速略快一些, 也即式(15)比实际更严峻些。

近似认为过渡期间输出电压仅仅靠电容电压维持, 则根据能量平衡关系, 有

$$\frac{1}{2} C_o (V_E^2 - V_{o,\min}^2) = V_E I_{o,\max} \Delta t \quad (17)$$

实际上流过电感的电流对电容具有一定充电作用, 也贡献一部分负载电流, 并且输出电压并不始终保持  $V_E$ , 因此式(17)也比实际更严峻些。

将式(16)代入式(17), 可解出电容容量下限  $C_{1,\min}$

$$C_{1,\min} = \frac{2V_E I_{o,\max}^2 L}{(V_E^2 - V_{o,\min}^2)(U_{\min} - V_E)} \quad (18)$$

## 2) 电压骤升

电压骤升发生在负载突然减小时, 最严重情况是由最重负载突变到最轻负载电流的情形。在过渡期间, 功率开关的导通比达到其下限, 近似认为是完全截止的。近似认为电感上存储的多余能量全部转化为电容的储能导致电容电压(即输出电压)上升, 可解出电容容量下限  $C_{2,\min}$

$$C_{2,\min} = \frac{I_{o,\max}^2 L}{V_{o,\max}^2 - V_E^2} \quad (19)$$

实际上电感的多余储能也会在负载上消耗一部分, 因此式(19)也比实际更严峻些。

结合式(18)和式(19), 输出电容的容量应满足

$$C_o > \max(C_{1,\min}, C_{2,\min}) \quad (20)$$

在实际当中, 考虑到导通比的下限大于 0 而其上限小于 1, 并且考虑到超级电容模块均压电阻的漏电效应和高频性能劣化,  $C$  和  $C_o$  的选取应考虑足够的余量, 一般可放大 1.5~4.0 倍。

## 2.4 其他参数设计

为了便于制作和减少开关损耗, 变换器的开关频率  $f$  一般不超过 150 kHz。

为了减小电感电流峰值, 一般希望变换器的工作范围内大部分处于连续导电模式 (CCM)。CCM 和 DCM 的临界电感  $L_C$  为<sup>[10]</sup>

$$L_C = \frac{(V_i - V_E)I_o}{2V_i V_E f} \quad (21)$$

可以根据式(21)以及变换器的工作范围  $V_i \in [U_{\min}, U]$  和  $I_o \in [I_0, \max(I_C, I_T)]$  来进行  $L$  的设计和调整。

## 3 实例

设计一台户外柱上开关监控智能终端 (GEA-PFT2W 型 FTU) 的电容储能开关电源, 该柱上开关的电压互感器二次侧额定电压为 AC 220 V, 操动机构电压也为交直流 220 V, 工作储

能电容取电于 220/24 V 隔离变压器 (考虑馈线末梢电压低于额定值 10% 的情况下, 整流后电压大于 DC 30 V)。FTU 的工作电压  $V_E$  为 5 V,  $V_{o,\min}=4.9$  V,  $V_{o,\max}=5.1$  V。FTU 的待机工作电流为  $I_0=450$  mA; 控制继电器时的工作电流  $I_C=620$  mA, 控制持续时间  $T_C=1$  s; 发信时的工作电流  $I_T=550$  mA, 发信持续时间  $T_T=2$  s。交流电源失去后, 要求待机工作时间  $T_0=60$  s, 期间允许控制操作 2 次, 允许发信 2 次。开关电源的平均工作效率  $\eta=78.5\%$ 。

根据第 3 节内容, 进行计算:

取  $U_{\min}=U/3=10$  V, 则  $\gamma_A=88.89\%$

$$W_0 = 5 \times 0.45 \times 60 = 135(\text{J})$$

$$W_C = 2 \times 5 \times 0.62 \times 1 = 6.2(\text{J})$$

$$W_T = 2 \times 5 \times 0.55 \times 2 = 11(\text{J})$$

$$W_L = 135 + 6.2 + 11 = 152.2(\text{J})$$

$$C > \frac{2 \times 152.2}{30^2 \times 88.89\% \times 78.5\%} = 0.4847(\text{F})$$

考虑一定余量, 工作储能电容  $C$  取值为 1 F/50 V。

电感  $L$  取 100  $\mu\text{H}$ 。

$$C_{1,\min} = \frac{2 \times 5 \times 0.62^2 \times 100 \times 10^{-6}}{(5^2 - 4.9^2)(10 - 5)} = 77.657(\mu\text{F})$$

$$C_{2,\min} = \frac{0.62^2 \times 100 \times 10^{-6}}{5.1^2 - 5^2} = 38.059(\mu\text{F})$$

考虑一定余量, 输出储能电容  $C_o$  取值为 220  $\mu\text{F}$  /10 V。

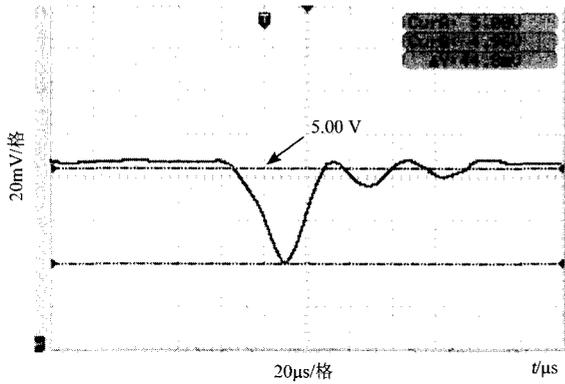
开关频率  $f$  取为 50 kHz, 则在  $V_i-I_o$  平面上该变换器的全部工作范围内, 变换器都处于 CCM。

根据被该 FTU 控制的柱上真空断路器操动机构的规格, 确定操作储能电容器选用 470  $\mu\text{F}$  /600 V。经实验验证, 该电容器可确保在交流电压失去的条件下对该柱上真空断路器进行 2 次可靠的合闸或分闸操作。

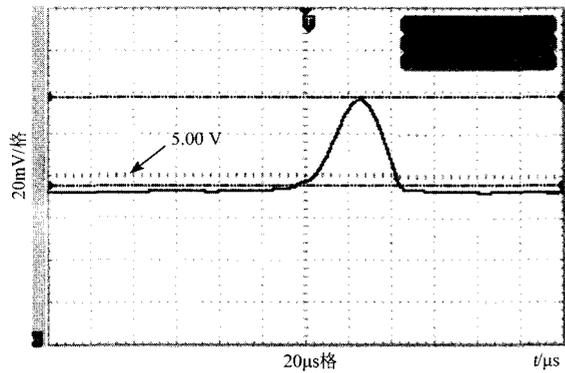
基于上述参数, 研制了一台电容储能开关电源, 功率开关管采用 MOSFET IRF9540, 二极管采用 MBR20100, PWM 控制器采用 TL494, 工作储能电容采用 1 F/50 V 的超级电容器。

在工作电容充电电压为 30 V 条件下, 分别采用电阻器作为负载模仿待机、发信和控制状态, 并用开关分别接入和断开, 测得待机时间达到 143 s。用该电源为 GEA-PFT2W 型 FTU 供电, 在成功地进行两次控制操作和两次上行通信后, 待机时间达到 141 s, 达到设计要求。实验中发现, 输入电压在 8.93 V 以上时, FTU 仍可以正常工作。

采用电阻器作为负载,并用开关分别接入和断开进行了从空载到满载和从满载到空载的实验,输出电压的波形如图4所示。



(a) 从空载到满载, 电压输入为 10 V



(b) 从满载到空载

图4 实验结果

Fig.4 Experiment results

由图4可见,  $V_{o,min}=4.96\text{ V}$ ,  $V_{o,max}=5.04\text{ V}$ , 达到设计要求。

### 4 结论

采用电容储能的自动化终端备用电源能够满足在失去正常供电电源后自动化终端待机、操作和通信的需要。

所进行的理论分析符合实际情况,所建议的设计方法是可行的。

所建议的电容储能的自动化终端备用电源已经应用于作者研制的配电自动化终端设备中,运行结果表明其是可行的。

### 参考文献

[1] 刘健,倪建立. 配电自动化新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[2] 胡毅,陈轩怒,杜砚. 超级电容器的应用与发展[J]. 电力设备,2008,9(1):19-22.  
HU Yi, CHEN Xuan-nu, DU Yan. Application and Development of Supercapacitor [J]. Electrical Equipment, 2008,9(1):19-22.

[3] 陈英放,李媛媛,邓梅根. 超级电容器的原理与应用[J]. 电子元件与材料,2008,27(1):6-9.  
CHEN Ying-fang, LI Yuan-yuan, DENG Mei-gen. Principles and Applications Supercapacitors[J]. Electronic Components and Materials, 2008,27(1):6-9.

[4] Zubieta L, Bonert R. Characterization of Double-layer Capacitors for Power Electronics Applications[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000,36:199-205.

[5] 隋国正,张力大. FTU 供电电源方案改进[J]. 电工技术,2008,(1):16-17.  
SUI Guo-zheng, ZHANG Li-da. Improvements on FTU Supplying [J]. Electric Engineering, 2008,(1):16-17.

[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,2004.

[7] LIU Jian, CHEN Zhi-ming, DU Zhong. A New Design on Switched Capacitor DC-DC Converters for Pocket Computer Systems [J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 1998, 45(2):228-235.

[8] 刘健,陈治明,钟颜儒. 开关电容 DC-DC 变换器的设计方法 [J]. 电子学报,1999, 27(4):102-106.  
LIU Jian, CHEN Zhi-ming, ZHONG Yan-ru. Design on Switched Capacitor DC-DC Converters [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(4):102-106.

[9] 刘健,董榕,杜文学,等. 城乡电网建设与改造[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

[10] 蔡宣三,龚绍文. 高频功率电子学:直流-直流变换部分[M]. 北京:科学出版社,1995.

收稿日期:2008-12-22; 修回日期:2009-02-19

作者简介:

程红丽(1966-),女,教授,硕士,硕士生导师,研究领域为高频功率电子电路;E-mail:edliu@bylink.com.cn

王立(1983-),男,硕士研究生,研究领域为电力电子电路和开关电源;

刘健(1967-),男,教授,博士,博士生导师,研究领域为电力系统自动化。