

# 基于超级电容器储能的配电自动化终端 直流电源设计及应用

刘树林<sup>1</sup>, 马一博<sup>1</sup>, 刘 健<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为解决现有配电自动化终端电源存在使用寿命短及维护困难的问题, 提出了一种基于超级电容器(SC)的智能直流不间断电源方案。采用升压变换器降低超级电容器的工作电压, 从而提高电容器储能的利用率, 延长失电情况下电源的待机工作时间; 根据超级电容器最小工作电压与剩余能量的关系, 确定了超级电容器最小有效工作电压; 根据变换器的期望输出功率、失电待机时间及超级电容器的最小工作电压, 确定了超级电容器容量; 通过对升压变换器最大输出纹波电压进行分析, 对其电感及输出滤波电容的进行了优化设计。实验结果验证了所提方案的可行性。

**关键词:** 配电; 配电自动化终端; 超级电容器; 升压变换器; 直流不间断电源; 储能

**中图分类号:** TM 91

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.026

## 0 引言

配电网自动化是实现故障快速定位、隔离以及供电恢复, 从而提高供电可靠性的重要手段, 也是智能电网的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>, 而配电自动化终端装置是实现配电自动化的基础环节<sup>[3]</sup>, 一般在户外运行, 其中的电源不仅要对自身进行供电还要对通信模块及控制回路跳、合开关的储能回路等<sup>[4]</sup>进行供电。当馈线环路出现永久性故障时, 环路线开关保护动作跳闸, 导致馈线全线停电, 这时配电自动化终端、通信设备、一次设备开关的操作都要求不间断供电。因此, 提供可靠的不间断电源是配电自动化终端开发设计中首要考虑的问题。传统配电自动化终端的直流电源通常采用蓄电池储能以实现不间断供电, 但蓄电池存在使用寿命短、功率密度低、放电性能受温度影响、充放电电流不能太大等问题<sup>[5-7]</sup>, 因此, 对于要求长寿命和高可靠性且环境恶劣的应用场合, 使用蓄电池作为储能元件就存在许多局限。

近年来, 超级电容器 SC(Super-Capacitor)作为一种新兴的储能设备, 与蓄电池相比, 具有存储能量大、充电速度快、循环使用寿命长、功率密度高、超低温特性和绿色环保等诸多优点<sup>[8-10]</sup>, 更适合应用于需要瞬时提供大功率的场合<sup>[10-11]</sup>, 同时, 将 SC 与蓄电池组合的混合储能技术, 可发挥各自优势, 已成为近年来的研究热点<sup>[12-14]</sup>, 并成功应用于电力系统<sup>[15-18]</sup>。

本文针对 SC 用作储能元件的不间断电源时所存在的问题, 提出一种通过附加升压变换器, 从而有

效提升超级电容储能利用率的智能直流不间断电源方案, 并将其应用于配电自动化终端单元中, 从而提高配电自动化系统的稳定性和可靠性。

## 1 智能直流不间断电源系统的组成和原理

SC 储能智能直流不间断电源系统主要由 EMI 滤波电路、AC/DC 变换器、驱动电路、升压变换器、双向可控开关、SC、控制器、按键、电源状态显示及告警信号输出电路等构成, 如图 1 所示。其主要原理为: 输入单相交流经 EMI 滤波电路后输入 AC/DC 变换器, 根据控制器发出的脉冲宽度调制(PWM)控制信息, 输出满足要求的直流电压, 一部分直流电压经过升压变换器为配电自动化终端提供稳定的输出电压; 在控制器的作用下, 双向可控开关正向导通, 另一部分直流电压经双向可控开关为 SC 进行恒流限压充电, 当充电到设定电压时, SC 处于浮充状态。

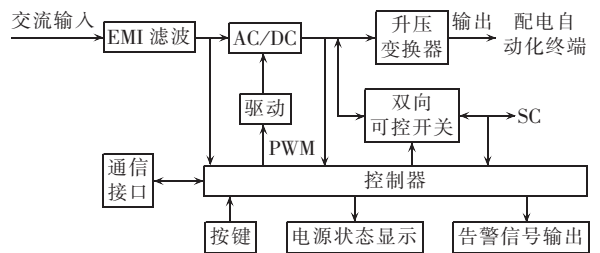


图 1 基于超级电容器的智能直流不间断  
电源系统框图

Fig.1 Block diagram of intelligent DC uninterruptible  
power supply based on SC

当交流失电时, 控制器检测到失电信号, 控制双向可控开关反向导通, SC 通过双向可控开关放电, 再经过升压变换器向配电自动化终端提供稳定的输出电压, 以实现配电自动化终端的不间断供

收稿日期: 2015-12-28; 修回日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977077, 51277149)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977077, 51277149)

电。同时,控制器向外部发出输入失电告警信号,并显示放电。当 SC 放电至欠压告警点时,控制器发出欠压告警信号,并显示欠压;当 SC 放电至设定的最小工作电压时,系统停止为配电自动化终端供电。

正常工作期间,升压变换器的开关处于关断状态,AC/DC 变换器的输出直接向配电自动化终端提供所需的直流输出电压,可减小开关损耗、提高效率。

通过按键可设定输出电压、输出电流、最大充电电流及电压和电流保护整定值等。智能直流不间断电源系统还可与配电自动化终端通信,通过调度中心可监控电源系统的工作状态。

在交流失电时,为了充分利用 SC 储能,所允许的最低工作电压应尽可能低,这样 SC 的电压将在很大范围内变化。因此,为确保交流失电期间,升压变换器的电气性能指标满足期望要求,升压变换器的设计尤为关键。下文将对升压变换器的参数设计、SC 最低电压的确定及其容量的计算进行深入讨论。

## 2 SC 的最小工作电压确定及其容量设计

### 2.1 SC 的最小工作电压确定

SC 的工作电压范围可从 0 到额定电压,为提高其储能利用率,本文提出引入升压变换器提升输出电压值,但随着电压的降低,其存储能量明显下降,且给升压变换器的设计也带来困难。因此,需要综合考虑各方面因素,确定 SC 的最小工作电压。

假设放电前,SC 的初始电压为  $U_M$ ,最小有效工作电压为  $U_{\min}$ ,则根据电容存储的能量  $W=0.5CU^2$  可得,由此造成的不可利用的剩余储能  $W_s$ (称为“残能”)与其初始能量  $W_M$  之比,即剩余储能比率  $\xi$  为:

$$\xi = \frac{W_s}{W_M} = \left( \frac{U_{\min}}{U_M} \right)^2 \quad (1)$$

根据式(1)可得,剩余储能比率  $\xi$  与归一化的电容电压关系如图 2 所示。

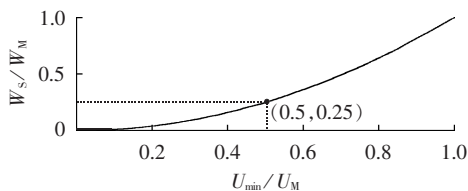


图 2 最小工作电压与剩余能量的关系曲线  
Fig.2 Relationship between minimum operating voltage and residual energy

由图 2 可见,  $W_s$  并不随着  $U_{\min}$  的减小而线性减小。当  $U_{\min}$  下降到一定程度后,  $W_s$  的减小变得很平缓,因此没有必要将  $U_{\min}$  设计得太低。由图 2 可知,一般可以取  $U_{\min}=0.5 U_M$ ,此时,对应能量利用率已达 75%(剩余储存能量比率仅 25%)。

### 2.2 SC 的容量设计

假设在直流不间断开关电源中,失电后 SC 需要提供的功率为  $P_o$ (输出电压  $U_o$  和电流  $I_o$  的乘积),变换器的转换效率为  $\eta$ ,需要维持的时间为  $T_w$ ,则失电后,SC 应提供的能量为:

$$W_1 = \frac{P_o T_w}{\eta} = \frac{U_o I_o T_w}{\eta} \quad (2)$$

根据 2.1 节的分析,由于受到剩余储能比率的限制,SC 放电可提供的能量应由初始电压  $U_M$  和有效最小工作电压  $U_{\min}$  决定,即 SC 可提供的能量为:

$$W_2 = 0.5 C_{SC} (U_M^2 - U_{\min}^2) \quad (3)$$

根据能量守恒,应有  $W_1 = W_2$ ,则由式(2)、(3)可得:

$$C_{SC} = \frac{2 U_o I_o T_w}{\eta (U_M^2 - U_{\min}^2)} \quad (4)$$

因此,可根据式(4)选取 SC 的容量  $C_{SC}$ 。

## 3 升压变换器电感和电容的优化设计

为提高超级电容器储能的利用率,输入电压将在较大的范围内变化,因此,智能不间断电源系统中引入升压变换器的设计也就变得尤为关键。输出纹波电压是升压变换器的重要指标之一,影响输出纹波电压的主要元件是电感和输出滤波电容,因此,升压变换器的优化设计主要考虑电感和电容的设计。

### 3.1 升压变换器的输出纹波电压分析

升压变换器的组成如图 3 所示。

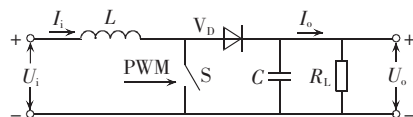


图 3 升压变换器结构  
Fig.3 Structure of Boost converter

升压变换器工作于连续导通模式(CCM)与不连续导通模式(DCM)及完全电感供能模式(CISM)与不完全电感供能模式(IISM)的临界电感  $L_C$  和  $L_K$  分别为<sup>[16-17]</sup>:

$$L_C = \frac{R_L d (1-d)^2}{2f} = \frac{R_L U_i^2 (U_o - U_i)}{2f U_o^3} \quad (5)$$

$$L_K = \frac{(1-d)^2 R_L}{2f} = \frac{R_L U_i^2}{2f U_o^2} \quad (6)$$

其中,  $f$  为开关频率;  $d$  为开关的导通比;  $R_L$  为负载电阻;  $U_i$ 、 $U_o$  分别为输入和输出电压。由式(5)和(6)可知,由于  $d < 1$ , 因此  $L_K > L_C$ 。因此,可将升压变换器划分为 3 种工作模式:① CISM;② 不完全电感供能且连续导通模式(IISM-CCM);③ 不完全电感供能模式且不连续导通模式(IISM-DCM),如图 4 所示。

升压变换器工作在模式①、②、③时的输出纹波电压  $U_{pp}$  分别为<sup>[19-20]</sup>:

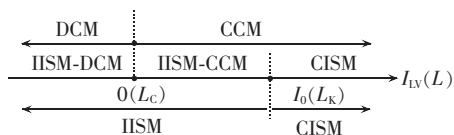


图 4 工作模式与电感及其最小电流的关系

Fig.4 Relationship among operating mode, inductor and its minimum current

$$U_{PP}^{(1)} = \frac{U_o - U_i}{R_L C f} \quad (7)$$

$$U_{PP}^{(2)} = \frac{U_o - U_i}{2 C U_o} \left( \frac{L U_o^3}{R_L^2 U_i^2} + \frac{U_i^2}{4 L f^2 U_o} + \frac{U_o}{R_L f} \right) \quad (8)$$

$$U_{PP}^{(3)} = \frac{2 R_L U_o (U_o - U_i) + L f U_o^2}{2 C f (U_o - U_i) R_L^2} - \frac{U_o \sqrt{2 L f U_o (U_o - U_i)}}{R_L C f (U_o - U_i) \sqrt{R_L}} \quad (9)$$

假设升压变换器的输入电压变化范围为  $[U_{i,\min}, U_{i,\max}]$ , 负载电阻范围为  $[R_{L,\min}, R_{L,\max}]$ , 则在整个动态范围内, 对应 CISM 与 IISM 的最小临界电感  $L_{KA}$  为:

$$L_{KA} = \frac{R_{L,\min} U_{i,\min}^2}{2 f U_o^2} \quad (10)$$

在整个动态范围内, 根据电感的不同取值, 在电感  $L$  轴上, 可将升压变换器的工作区域分成 5 个区间, 如图 5 所示。其中,  $L_{KC}$  为整个动态工作范围内的最大电感。



图 5 升压变换器的工作区域与电感的关系

Fig.5 Relationship between Boost converter operating region and inductor

通过对 5 个区间的最大输出纹波电压进行分析, 在整个动态范围内, 当  $L \geq L_{KA}$  时, 升压变换器的最大输出纹波电压在  $U_i = U_{i,\min}$ ,  $R_L = R_{L,\min}$  时取得极小值为:

$$\min \{U_{pp,\max}\} = \frac{U_o - U_{i,\min}}{f C R_{L,\min}} \quad (11)$$

可见, 只要  $L \geq L_{KA}$ , 则最大输出纹波电压的极小值与电感无关, 这即是选择电感和电容的依据。

### 3.2 升压变换器的电感设计

对于升压变换器, 一方面, 通常不宜将输出功率较大的工作范围设计成 IISM-DCM, 因为对于相同的平均输入电流, IISM-DCM 的峰值电流较高, 在较大的输出功率时, 开关器件上的电流应力将很大。另一方面, 要使变换器在整个动态范围内工作在 CISM, 其  $U_{PP}$  最小、开关器件上的电流应力也较小, 但由式 (6) 可知, 电感的设计必须满足:

$$L > L_{KC} = \frac{R_{L,\max} U_{i,\max}^2}{2 f U_o^2} \quad (12)$$

显然, 此种情形下电感取值很大, 将会影响变

换器的动态性能和体积。所以, 电感的设计值应该满足  $L < L_{KC}$ 。

升压变换器的设计通常以在整个动态工作范围内  $U_{PP}$  的最大值为依据。根据前文的分析可得, 当  $L \geq L_{KA}$  时, 升压变换器的最大输出纹波电压极小, 且最大输出纹波电压的极小值与电感无关。所以, 在给定的输入电压和负载变化范围内, 最小负载电阻和最低输入电压所对应的临界电感  $L_{KA}$ , 即为在整个工作范围内, 使得最大输出纹波电压极小的最小电感, 即电感的最佳取值为:

$$L_{OPT} = L_{KA} = \frac{R_{L,\min} U_{i,\min}^2}{2 f U_o^2} \quad (13)$$

### 3.3 升压变换器的输出滤波电容设计

通过分析输出纹波电压, 根据式 (11) 可知, 电容的最小理论值为:

$$C_{\min} = \frac{U_o - U_{i,\min}}{f U_{PP} R_{L,\min}} \quad (14)$$

由于电容存在等效串联电阻 (ESR) 和等效串联电感 (ESL), 为达到期望的电压纹波水平, 在设计输出滤波电容时, 必须引入适当的裕度系数  $\lambda$ , 即:

$$C = \lambda C_{\min} = \frac{\lambda (U_o - U_{i,\min})}{f U_{PP} R_{L,\min}} \quad (15)$$

通常,  $\lambda$  的取值为 2~4。

## 4 应用实例及实验结果

根据馈线终端装置 (FTU) 的性能指标要求, 设计一台采用升压变换器及 SC 储能智能直流不间断电源系统, 其交流输入电压为  $220 \pm 44$  V, 升压变换器输出为 24 V/1 A, 输出纹波电压  $U_{PP} = 24 \times 2\%$  (V) = 480 (mV), 失电后系统还能维持工作 15 min (900 s)。

### 4.1 SC 的容量设计

根据上述技术指标可得:  $U_o = 24$  V,  $I_o = 1$  A,  $T_W = 900$  s; 假设升压变换器的转换效率为  $\eta = 85\%$ , SC 的初始电压  $U_M = 24$  V, 根据 2.1 节分析, 选取  $U_{\min} = 0.5 U_M = 12$  V。因此, 由式 (4) 可计算得到 SC 的容量  $C_{SC} \approx 117.6$  F, 本例中取 SC 容量为 120 F (电压为 27 V)。

### 4.2 升压变换器的电感和电容计算

对于升压变换器, 根据上述指标和参数可得:  $U_i = 12 \sim 24$  V,  $U_o = 24$  V,  $I_o = 1$  A, 则  $R_{L,\min} = 24 \Omega$ ,  $U_{i,\min} = 12$  V。本例中, 升压变换器的工作频率  $f = 100$  kHz, 则根据式 (13)、(15) 计算可得: 电感的最佳取值为  $L_{OPT} = L_{KA} = 30 \mu\text{H}$ , 输出滤波电容的容量为  $C = 31.5 \mu\text{F}$  ( $\lambda = 3$ )。本例中, 输出滤波电容的容量取为 33  $\mu\text{F}$ 。

### 4.3 实验结果及验证

#### a. 升压变换器的工作模式验证。

为了验证变换器存在 3 种工作模式, 取电感值为 60  $\mu\text{H}$ 、25  $\mu\text{H}$ 、10  $\mu\text{H}$ , 分别对应 CISM、IISM-CCM

和 IISM-DCM,其输出电压和电感电流波形分别如图 6(a)、(b)和(c)所示。

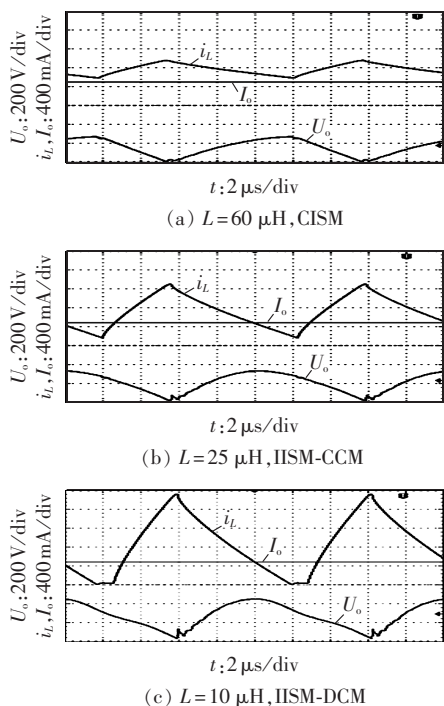


图 6 升压变换器电感电流和输出电压实验波形

Fig.6 Experimental waveforms of inductor current and output voltage of Boost converter

从图 6 可看出:对于给定的负载、电容和开关频率,升压变换器将因电感的取值不同而工作于不同的模式,输出电压的纹波也会有显著区别。开关关断期间,在 CISM ( $L=60 \mu\text{H} > L_{KA}=30 \mu\text{H}$ ) 时,由于电感电流  $i_L$  一直大于输出电流,所以电感给电容充电,输出纹波电压上升,直到下个开通周期到来才开始下降,如图 6(a) 所示;在 IISM-CCM ( $L=25 \mu\text{H} < L_{KA}=30 \mu\text{H}$ ) 时,开关关断期间,输出纹波电压在电感电流  $i_L$  下降到小于输出电流时就开始下降,如图 6(b) 所示,此时输出纹波电压随着电感的减小而增加;在 IISM-DCM ( $L=10 \mu\text{H}$ ) 时,开关关断期间,电容电压在电感电流  $i_L$  下降到小于输出电流时就开始下降,所不同的是需要经历  $i_L=0$  的下降段,如图 6(c) 所示,所以此时的输出纹波电压最大。

#### b. 升压变换器滤波电感的优化设计验证。

为了验证电感优化设计方法的正确性,令电感取值范围为  $5 \sim 60 \mu\text{H}$ ,负载和升压变换器的取值组合分别为: $R_L=24 \Omega, U_i=12 \text{ V}; R_L=24 \Omega, U_i=18 \text{ V}; R_L=72 \Omega, U_i=12 \text{ V}; R_L=72 \Omega, U_i=18 \text{ V}$ 。对应的  $U_{FP}$  分别如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,当变换器工作在 CISM 时,  $U_{FP}$  与  $L$  无关。而当  $L$  的取值大于相应负载电阻和输入电压所对应 CISM 和 IISM 的临界电感时,其  $U_{FP}$

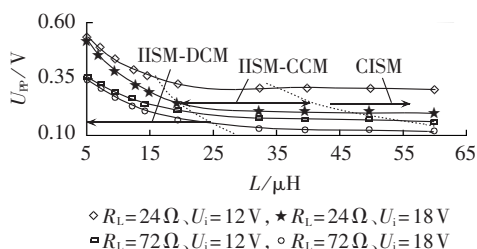


图 7  $U_{FP}$  与  $R_L, U_i$  及电感的关系

Fig.7 Relationship among  $U_{FP}, R_L, U_i$  and inductor

最小。且当电感  $L > L_{KA}=30 \mu\text{H}$  (本设计取为  $39 \mu\text{H}$ ) 时,升压变换器的最大输出纹波电压约为  $350 \text{ mV}$  (小于  $480 \text{ mV}$ ),达到设计要求。

可见,最小负载电阻和最低输入电压所对应的临界电感,就是使得最大输出纹波电压极小的最小电感,且其极小值与电感无关,实验结果与理论分析相符。

#### c. 电源的失电维持时间验证。

首先采用电阻器作为负载模拟待机实验,测试待机时间。

当系统上电进入稳定状态后,测得 SC 的电压  $U_M=24.3 \text{ V}$ ,调节模拟电阻器使升压变换器输出电流为  $1 \text{ A}$ 。然后切断输入交流电源,开始计时,电容开始放电并维持正常输出,直到输出关断,测得电容终止电压为  $11.9 \text{ V}$ ,待机时间为  $912 \text{ s}$ 。

理论计算待机时间应为  $953.9 \text{ s}$ ,但实测升压变换器效率为  $85.5\%$ ,并考虑到双向可控开关也会产生损耗,因此,  $912 \text{ s}$  的待机时间已达到了设计要求,与理论计算基本相符,说明了本文设计方法的正确性和可行性。

#### 4.4 在配电自动化终端中的应用

采用该电源为 GH-F30 型 FTU 供电,断电后的待机时间可达  $1543 \text{ s}$  (超过  $25 \text{ min}$ ),说明所设计的基于 SC 的不间断电源完全可用于 FTU。

通过 FTU 可将 SC 的工作电压、电源的输出电压、工作状态等信息以通信的方式传到配电调度中心,使得用户在远端即可对 SC 的工作状态进行实时监控。用户还可在调度中心对 SC 的充、放电电流或电压进行设定。基于该智能直流不间断电源的配电自动化终端产品已在现场广泛应用,效果良好。

#### 5 结论

采用 SC 作为储能元件的智能直流不间断电源,可在失电情况下,使配电自动化终端实现不间断供电。通过采用升压变换器,可最大限度地降低 SC 的工作电压,提高 SC 储能的利用率,延长失电情况下的待机工作时间。但考虑到 SC 所存储能量随着电压的降低呈指数衰减,因此,其最小工作电压设定为

初始电压的一半较为合理。根据断电后所要维持的输出功率及所期望的待机时间,提出了一种 SC 容量的设计方法。

在整个动态工作范围内,升压变换器存在一最小电感,即最小负载电阻和最低输入电压对应的 CISM 和 IISM 的临界电感,只要电感取值大于该最小电感,则升压变换器的最大输出纹波电压极小,且其极小值与电感无关,据此,得出了电感及输出滤波电容的优化设计方法。

应用实例及实验结果说明:利用所提出的设计方法及方案所研制的智能直流不间断电源,可满足配电自动化终端供电电源的各项性能指标要求。在调度中心即可对 SC 的充、放电及电源的工作情况进行实时监控,操控方便。

## 参考文献:

- [1] 刘健,程红丽,张志华. 配电自动化系统中配电终端配置数量规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(12):44-50.  
LIU Jian, CHENG Hongli, ZHANG Zhihua. Planning of terminal unit amount in distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12):44-50.
- [2] 石文江,冯松起,夏燕东. 新型智能配电自动化终端自描述功能的实现[J]. 电力系统自动化,2012,36(4):105-109.  
SHI Wenjiang, FENG Songqi, XIA Yandong. New intelligent power distribution automation terminal self-describing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19):105-109.
- [3] 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.
- [4] 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 Guozheng, ZHANG Lida. Improvement on power supply scheme of FTU[J]. Electric Engineering, 2008(1):16-17.
- [5] 闫晓金,潘艳,宁武,等. 超级电容-蓄电池复合电源结构选型与设计[J]. 电力电子技术,2010,44(5):75-77.  
YAN Xiaojin, PAN Yan, NING Wu, et al. Design and analysis of the structure of ultracapacitor/battery hybrid system[J]. Power Electronics, 2010, 44(5):75-77.
- [6] 谢石晓,杨莉,李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术,2012,36(5):79-84.  
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5):79-84.
- [7] 张国驹,唐西胜,齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化,2011,35(20):24-28.  
ZHANG Guojun, TANG Xisheng, QI Zhiping. Design of a hybrid energy storage system on leveling off fluctuating power outputs of intermittent sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20):24-28.
- [8] ZUBIETA L, BONERT R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36(1):199-205.
- [9] 刘健,赵树仁,张小庆. 中国配电自动化的进展及若干建议[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):6-21.  
LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development of distribution automation in China and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19):6-21.
- [10] 夏向阳,孔祥霖,帅智康,等. 基于磁集成结构 DC-DC 变换器的超级电容储能系统[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):95-99.  
XIA Xiangyang, KONG Xiangji, SHUAI Zhikang, et al. Super-capacitor energy storage system based on DC-DC converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11):95-99.
- [11] 徐青山,钱海亚,陈楷. 短时阴影情况下光伏抗失配能力的超级电容补偿策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):48-53.  
XU Qingshan, QIAN Haiya, CHEN Kai. Super capacitor compensation strategy for PV anti-mismatch under short-time partial shadows[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2):48-53.
- [12] 王振浩,张延奇,李国庆,等. 基于超级电容器的直流系统混合储能研究[J]. 电网技术,2010,34(4):158-162.  
WANG Zhenhao, ZHANG Yanqi, LI Guoqing, et al. Research on hybrid energy storage for DC system of substations and Power plants based on super capacitors[J]. Power System Technology, 2010, 34(4):158-162.
- [13] 张国驹,唐西胜,齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):85-89.  
ZHANG Guojun, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12):85-89.
- [14] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-6.  
DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7):1-6.
- [15] 王云玲,曾杰,张步涵,等. 基于超级电容器储能系统的动态电压调节器[J]. 电网技术,2007,31(8):58-62.  
WANG Yunling, ZENG Jie, ZHANG Buhan, et al. Dynamic voltage conditioner based on ultracapacitor energy storage system[J]. Power System Technology, 2007, 31(8):58-62.
- [16] 刘成印,李强,薛安忠,等. 超级电容直流操作电源[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):115-117.  
LIU Chengyin, LI Qiang, XUE Anzhong, et al. DC operating power supply with supercapacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11):115-117.
- [17] 鲁鸿毅,何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(2):87-91.  
LU Hongyi, HE Benteng. Application of the super-capacitor in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2):87-91.
- [18] 李霄,胡长生,刘昌金,等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):86-90.  
LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, et al. Modelling and controlling of SCES based wind farm power regulation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9):86-90.
- [19] 刘树林,刘健. 开关变换器分析与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [20] LIU Shulin, LIU Jian, HONG Mao, et al. Analysis of operating

modes and output ripple voltage of Boost DC-DC converters and its design considerations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(4):1813-1821.

作者简介:

刘树林(1964—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力电子技术 in 电力系



刘树林

统中的应用(E-mail:lsigma@163.com);

马一博(1981—),男,陕西西安人,博士研究生,主要研究方向为开关变换器分析与设计;

刘健(1967—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,总工程师,博士,主要研究方向为配电网及其自动化技术。

Design and application of super-capacitor-based DC power-supply for power distribution automation terminal

LIU Shulin<sup>1</sup>,MA Yibo<sup>1</sup>,LIU Jian<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Science & Technology,Xi'an 710054,China;

2. Shaanxi Electric Power Research Institute,Xi'an 710054,China)

**Abstract:** Aiming at the short service life and difficult maintenance of DC power-supply of power distribution automation terminals,a scheme of intelligent DC uninterrupted power-supply based on SC(Super-Capacitor) is put forward. The Boost converter is used to reduce the operating voltage of SC for raising the utilization rate of its energy storage to extend the standby time in case of power loss. The minimum operating voltage of SC is determined according to the relationship between its minimum operating voltage and its residual energy,while its capacity is determined according to the expected output power of Boost converter,the standby time and the minimum operating voltage of SC. The maximum output ripple voltage of the Boost converter is analyzed and its inductor and the capacitor of output filter are optimally designed. The experimental results verify the feasibility of the proposed scheme.

**Key words:** electric power distribution; power distribution automation terminal; super-capacitor; Boost converter; DC uninterrupted power supply; energy storage