

文章编号: 1000-5862(2016)02-0120-06

# 串联超级电容组动态分段充电控制策略

于 鹏<sup>1,2</sup> 杨仁刚<sup>2\*</sup>

(1. 渤海大学工学院 辽宁 锦州 121000; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院 北京 100083)

**摘要:** 针对目前的超级电容组充电策略存在过压风险和容量利用率较低的缺陷,在现有充电方法的基础上,提出一种动态分段超级电容充电控制策略,提高了超级电容容量利用率。该方法划分为恒流充电、恒压充电与浮充3个阶段,恒流充电又划分为启动阶段、恒流阶段与充电终止阶段,恒压充电根据单体电压动态确定,设计了状态机实现该方法。采用带有均压电路的串联电容组模型进行仿真实验以验证充电效果。仿真结果表明:该方法可将超级电容利用率提高9%。

**关键词:** 超级电容; 充电策略; 启动电流; 阶梯电压

**中图分类号:** TM 53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2016.02.03

## 0 引言

要提高新能源在电网中应用的比例,必须采用新的技术手段抑制电网波动<sup>[1]</sup>。超级电容容量大,循环寿命长,可以快速大功率充放电,适合用于调节一定范围之内的电网电量波动。超级电容串联储能系统充电不当会造成电容容量利用率低的问题,还存在过流过压风险。因此充电控制策略决定了超级电容在电网中应用的效率,也影响超级电容及充电器的可靠性,是超级电容储能应用研究的重点内容。

目前的电池/电容充电模式主要有恒流法、恒压法、恒功率法、浮充/涓流法和脉冲法<sup>[2]</sup>。恒流法在充电过程中充电电流不变,在超级电容充电策略中应用较为普遍<sup>[3]</sup>。恒压法充电电压保持恒定,恒功率法指充电过程中电压电流存在变化但是功率保持恒定。浮充也是一种恒压充电方法,一般指在恒压基础上降低充电电压进行持续小电流充电。脉冲法采用脉冲电流进行周期性重复充电。在以上充电模式基础上形成了2段法、3段法等充电控制策略。2段法如文献[4]所述先恒流充电,再恒功率充电。文献[5]采用先恒流,再浮充的方法。文献[6]先采用恒流限压充电方式,再转入恒压浮充方式。文献[7]先采用脉冲充电,再采用浮充补充。3段法一般指充电器充电分为3个主要阶段,包括恒流阶段、恒压阶段、浮充/涓流阶段<sup>[8]</sup>。3段法还包括对充电模式与

参数进行修改的方法<sup>[9]</sup>。此外目前还出现了智能充电法,这类方法实时监测储能单元状态,根据控制算法判断充电控制参数与模式<sup>[10-11]</sup>。充电控制技术又可分为根据时间的控制技术与根据电池的状态特性的控制技术<sup>[12]</sup>。

目前的充电策略在蓄电池领域已经投入商业应用,但是在超级电容领域应用存在不足。超级电容组充电具有如下2个主要特点:(i) 可以进行大电流快速充电;(ii) 电容组一般具有均压电路。文献[13]分析了恒流、恒压、恒功率超级电容充电方式的能量利用效率,该文献认为超级电容恒流充电电流越大能量利用效率越高。文献[14]同样认为应采用恒流充电提高能量利用率,并建议恒流充电与恒功率充电混合。但是恒流法在结束阶段存在电压跌落,影响电容容量利用率。文献[9]指出超级电容充电结束时存在端电压突变和电容充电不满的情况。在大电流充电停止时,超级电容端电压会出现电压跌落,在超级电容串联增多的情况下电压跌落会更大,导致电容容量利用率降低。均压电路也会导致电容电压逐渐降低而使电容容量利用率降低。恒流法在启动瞬间还存在过流/过压风险而降低充电器与超级电容装置的可靠性。文献[15]指出PWM整流器在初始阶段如果不限定电压值容易损坏设备。恒压法在充电初始阶段容易出现过流损坏充电器。浮充法电流小速度慢,只适合于补充漏电流。脉冲法不容易控制充电电流,其脉冲电流对超级电容极片与电解液的

收稿日期: 2015-10-01

基金项目: 国家“863”高技术基金(2012AA050217)资助项目。

通信作者: 杨仁刚(1954-),男,辽宁大连人,教授,博士生导师,主要从事供配电技术的研究。

影响还有待深入研究. 2 段法、3 段法组合使用各种充电模式, 依然存在启动、结束阶段过流/过压风险大, 通用性不强, 超级电容利用率低的问题. 智能充电法控制器设计有待研究.

目前的充电策略研究尚未考虑充电策略对储能容量利用率的影响和均压电路对超级电容储能装置容量利用率的影响.

本文针对提高电容容量利用率的问题并考虑均压电路工作效果, 提出动态分段法充电控制策略, 同时考虑降低启动过流风险. 动态分段法充电控制策略混合了基于时间的控制与根据电容状态特性的控制, 可以归类为智能充电法. 这种控制策略实时根据超级电容状态改变充电参数与控制阶段, 将充电过程分为分段恒流、阶梯恒压和浮充阶段. 通过动态分段充电提高电容利用率, 减少充电器过流的风险. 本文研究动态分段式充电方法在超级电容充电中应用的原理并通过仿真实验验证该方法的有效性.

## 1 算法原理

### 1.1 充电原理与控制策略

动态分段策略总体分为分段恒流阶段、阶梯恒压阶段和浮充阶段. 动态分段式控制策略为:

1) 分段恒流阶段又划分为启动、阶梯恒流和充电终止 3 个阶段. 启动阶段线性增加启动电流, 增加到设定值之后转入恒流充电. 阶梯恒流阶段在每个阶梯时间段采用恒定电流充电. 终止阶段由临时恒压与分段恒流 2 个子阶段构成. 这 2 个子阶段动态交错进行.

2) 阶梯恒压阶段采用不断升高的恒定压充电. 在一个阶梯电压期间采用恒定值. 重复此过程直到单体电压值与额定电压值之差达到要求为止.

3) 浮充阶段降低电压, 保持长时间恒压小电流充电.

### 1.2 充电控制状态机

为了实现动态分段控制策略, 设计通过状态机动态生成控制指令. 状态机控制具有增强控制策略通用性、降低计算算法复杂性、易与可控整流电路兼容的优点.

充电的不同阶段对应状态机的 5 个不同状态: 充电启动阶段对应启动状态, 恒流充电阶段对应阶梯恒流状态, 充电终止阶段对应交错转换的阶梯恒流状态与临时恒压状态. 阶梯恒压阶段对应阶梯恒压状态, 浮充阶段对应浮充状态. 工作状态在外部参

数设定之后根据电容电量信号自动判定, 各个状态根据条件转换, 每个状态都输出控制指令由外部设备执行.

接下来依次说明这 5 个状态开始与结束的条件, 并说明状态对应的输出.

1) 进入启动状态由外部事件  $S_{\text{cevent}}$  或电容组端电压  $u_z$  情况触发.  $S_{\text{cevent}}$  事件由充电控制器根据充电条件确定, 当  $S_{\text{cevent}}$  事件对应布尔变量为真时触发充电, 充电条件可以根据具体情况调整. 当电容组端电压  $u_z$  低于设定值  $u_{\text{lowlimit}}$  时也会触发充电. 启动状态的输出为电流控制信号. 启动状态电流控制指令值为斜率为  $k$  的直线  $i_o = kt$ , 其中  $i_o$  为启动状态输出指令电流;  $k$  为设定指令电流斜率;  $t$  为启动状态持续时间. 启动状态的结束通过判断串联总电压  $u_z(t)$  大于设定值  $u_{\text{start}}$  决定.

2) 分段恒流状态由启动状态结束时自动转入. 分段恒流状态输出恒流充电指令电流. 指令电流根据进入恒流阶段的次数  $i_s = i_e / 2^N$  衰减, 其中  $i_s$  代表恒流充电电流;  $i_e$  代表外部设定电流;  $N$  为进入分段恒流状态的次数. 分段恒流状态的结束判断单体最大电压  $u_{\text{max}}$  大于设定值  $u_{\text{trans}}$  决定.

3) 临时恒压状态由分段恒流状态结束时自动转入. 临时恒压状态输出为恒压电压指令. 电压指令设置为由恒流状态转入临时恒压状态时刻的电容组总电压  $u_z(t_{\text{trans}})$ , 其中  $t_{\text{trans}}$  为恒流转入恒压的状态转换时刻. 临时恒压状态的结束通过计时, 在设定延时  $t_{\text{delay}}$  时采样总电压  $u_z(t_{\text{delay}})$  判断. 若总电压  $u_z(t_{\text{delay}})$  与期望电压  $u_e$  差值大于设定限值时, 则临时恒压状态转回阶梯恒流状态.

4) 阶梯恒压状态的开始通过临时恒压状态判断总电流  $i_z(t)$ , 当总电流  $i_z(t)$  小于设定值  $i_{\text{evol}}$  时, 临时恒压状态转入阶梯恒压状态. 阶梯恒压状态输出指令电压动态设置, 电压设定值为

$$u_{A_k} = \sum_{i=1}^n u_{c_i} (u_{c_e} - \max(u_{c_i})) , \quad (1)$$

其中  $k = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, n$ ,  $u_{A_k}$  为第  $k$  充电终止电压;  $n$  为串联单体总数;  $u_{c_e}$  为单体额定电压;  $k$  为阶梯电压的递增编号. 阶梯恒压状态动态电压设置值的改变通过判断总电流  $i_z$  和总电压  $u_z$  实现. 设  $i_{\text{stair}}$  为阶梯恒压状态电流设定限值, 当  $i_z$  小于  $i_{\text{stair}}$  且总电压  $u_z$  小于设定上限  $u_{\text{uplimit}}$  时根据 (1) 式刷新电压设定值. 阶梯恒压状态的结束通过判断总电流  $i_z$  和总电压  $u_z$  实现, 当总电压  $u_z$  大于设定上限  $u_{\text{uplimit}}$  且总电流小于设定下限  $i_{\text{flimit}}$  时阶梯恒压状态结束进入浮充状态.

5) 浮充状态的开始由阶梯恒压状态结束自动转入. 浮充状态输出充电控制电压符合  $u_z - u_{ge} = \varepsilon$ , 其中  $u_z$  为测量模组总电压;  $u_{ge}$  为模组设定电压;  $\varepsilon$  为确定值.

浮充状态的结束通过判断指令  $S_{cevent}$  或总电压  $u_z$  完成, 当判断指令  $S_{cevent}$  为真或总电压  $u_z$  低于设定值时, 浮充结束, 进入充电启动阶段. 控制策略状态转换图如图 1 所示.

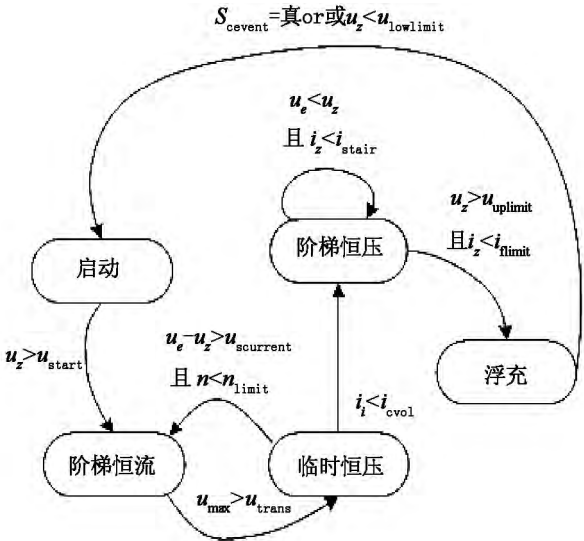


图 1 动态分段法充电状态转换图

变量表见表 1. 其中电容组采集单体电压电量、总电流电量与总电压电量做为状态判断依据.

表 1 变量表

序号	符号	参数名
1	$v_{max}$	单体最高电压 /V
2	$v_z$	电容组总电压 /V
4	$i_z$	电容组总电流 /A
5	$n$	分段恒流状态计数
6	$S_{cevent}$	充电开始事件

状态转换参数表见表 2. 状态参数一般根据超级电容额定参数人工设定. 状态参数设定之后, 充电过程会以此为依据自动决定不同模组的工作状态. 表 2 给出了本文中的状态转换设置值.

2 仿真实验

采用 Simulink 试验环境验证动态分段充电方法的合理性. 实验设计超级电容串联组在均压电路工作情况下充电. 规模化储能系统由串联超级电容组单元组合构成, 实验通过少量电容串联组构成的储能单元研究充电控制策略、均压电路和超级电容组

的总体特性. 具体实验设置与实验结果如下.

表 2 状态转换参数表

符号	含义	设置值
$v_{start}$	启动结束判断电压 /V	0.50
$v_{trans}$	恒流转临时恒压总电压限值 /V	2.95
$t_{delay}$	临时恒压延时 /s	0.20
$n_{limit}$	电流消减指数限值	8.00
$\Delta v_{scurrent}$	临时恒压转入恒流限值 /V	0.30
$i_{evol}$	临时恒压转入动态阶梯恒压限值 /A	0.50
$i_{flimit}$	转入浮充限流 /A	0.01
$v_{uplimit}$	转入浮充电压限值 /V	11.95
$i_{stair}$	阶梯恒压电流限值 /V	0.05
$v_e$	电容组额定总电压 /V	12.00

2.1 超级电容模型

对于超级电容的描述采用经典模型, 如图 2 所示.

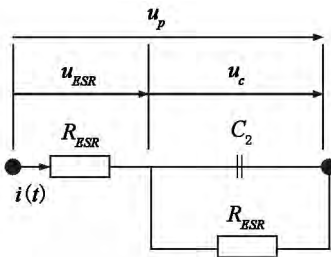


图 2 经典电容模型

由图 2 可知, 超级电容模型由其容量  $C$ 、内阻  $R_{ESR}$ 、并联内阻  $R_{ESP}$  描述.

2.2 实验设置

设电容模组采用超级电容组 4 只串联, 假设额定电压 12 V. 实验系统原理见图 3, 其中均压电路采用文献 [16] 所介绍的电路. 为了对比分析动态分段法的性能, 实验分别采用动态分段法与普通 3 段法对参数相同的超级电容组进行充电.

表 3 给出仿真实验的超级电容模型数据. 设超级电容充电额定电压为 3 V. 记录模组单体电压与总模组电压时间序列. 为了便于观察动态分段法的效果, 实验采用普通 3 段法充电模型与本文控制策略模型进行比较. 其中动态分段法额定电流 23 A, 恒定电压自动确定, 浮充电压设定为 2.9 V. 普通 3 段法采用相同的额定电流 23 A, 恒定电压自动确定, 浮充电压设定为 2.8 V.

表 3 超级电容单体参数

序号	$C/F$	$R_{esr}/\Omega$
1	10.0	0.003 00
2	11.0	0.002 50
3	10.3	0.002 56
4	10.6	0.002 53

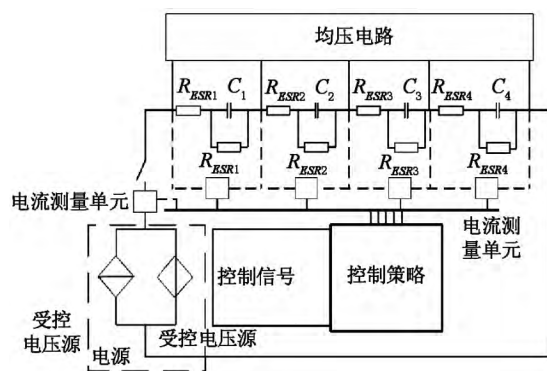


图3 动态分段法充电电路原理

### 2.3 充电实验结果

串联超级电容组充电启动阶段电压波形比较见图4, 充电终止阶段波形比较见图5. 阶梯恒压充电阶段波形比较见图6. 4 串电容组总端电压波形见图7, 电容单体端电压波形见图8.

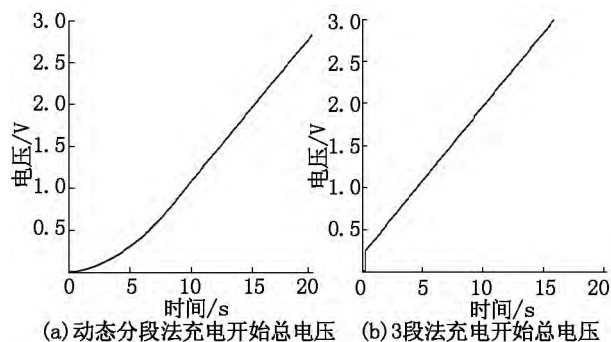


图4 充电启动阶段电压波形比较

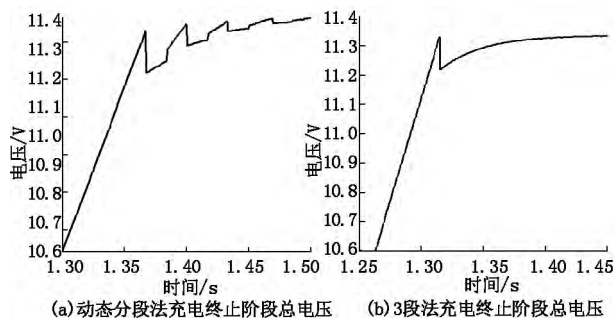


图5 充电终止阶段波形比较

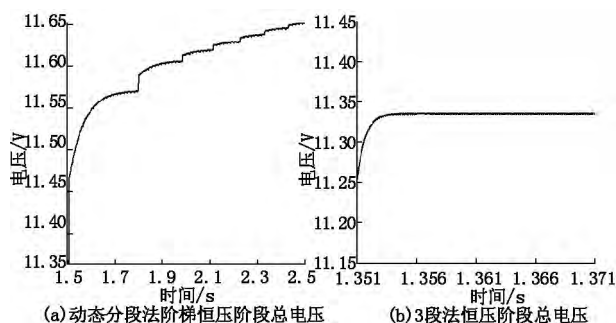


图6 恒压充电阶段波形比较

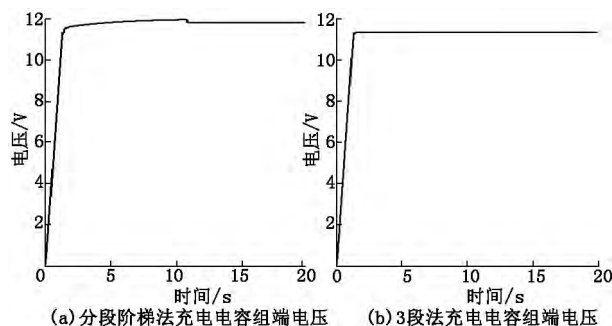


图7 4 串电容组端电压充电波形

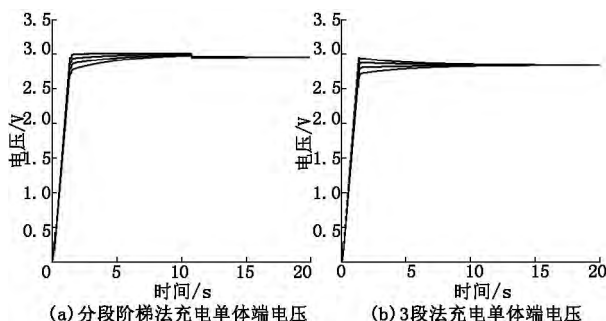


图8 采用充电策略充电的单体电压波形

### 2.4 结果分析

由图4(a)可知, 初始阶段充电电流逐渐提高, 降低了启动瞬间过流的风险. 图4(b)为普通3段法充电启动过程, 在接近0s处, 存在电压跳变. 此结果表明, 采用动态分段法对串联超级电容组充电, 初始电流逐渐升高, 因此可以预防因电流突变可能造成的充电器损坏.

由图5(a)可知, 在分段恒流充电结束阶段, 单体充电电压达到最大值以后, 控制器进入临时恒压充电状态, 再减小充电电流继续充电, 同时电压跌落逐渐减小. 当充电电流减小为初始恒定充电电流的1/8时, 停止恒流充电时刻电压降落已经小于0.1V. 图5(b)直接切换为恒压充电方法, 电压跌落较大. 在高压串联电容组中充电电流越大电压跌落的现象将越严重, 此时如果直接转换为恒压充电能量效率较低. 因此分段恒流充电保证了能量效率.

由图6(a)可知, 阶梯电压充电阶段, 电压曲线阶梯状升高. 图6(b)恒压充电电压低于本文方法的电压.

由图7(a)可知, 充电开始阶段电压逐渐升高, 在恒流充电向恒压充电转折阶段存在电压的跌落, 在阶梯恒压阶段端电压自动逐渐上升直到串联电容额定电压为止. 而图7(b)只采用3段法在恒压充电阶段中单体不过压情况下充电终止电压明显低于动态分段法的充电终止电压.

由图8(a)可知, 在均压电路作用下, 电容单体

电压趋近于一致,而且逐渐升高.在 10 s 处,图 8( a) 单体充电在结束时电压明显高于图 8( b) 充电在结束时电压.定义超级电容容量利用率为

$$\eta = q_i / q_e = cu_i / cu_{ce} = u_i / u_{ce},$$

其中  $\eta$  为电容容量利用率,  $u_i$  为单体电压.

容量利用率与储能总能量采用电容模组充电获得最高电压时进行计算,与设定浮充电电压值无关.在串联单体数为  $n$  的情况下容量利用率为

$$\eta_{\text{group}} = \sum_{i=1}^n u_{ci} / (nu_{ce}),$$

由此可知,在额定电压相同情况下单体电压越高,组容量利用率越高.因此,采用本文方法充电容量利用率高于普通 3 段法.

普通 3 段法与本文充电方法单体容量利用率的具体比较见表 4.

表 4 单体容量利用率比较

序号	本文方法充电			普通三段法充电		
	容量/F	最高电压/V	容量利用率/%	容量/F	最高电压/V	容量利用率/%
1	10.0	3.000	100.0	10.0	2.850	95.0
2	10.3	2.991	99.7	10.3	2.841	94.7
3	10.6	2.977	99.2	10.6	2.828	94.2
4	11.0	2.964	98.8	11.0	2.816	91.0

由表 4 数据计算得到,充电结果采用本文方法总容量利用率为 99.43%,采用普通 3 段法总容量利用率为 94.45%,采用本文方法容量利用率提高 4.98%.

由表 4 数据根据电容储能公式计算可知采用本文方法充电总储能为 186.362 8 J,采用普通 3 段法充电总储能为 168.181 0 J.本文提出的动态分段法充电的串联超级电容组总储能比普通 3 段法提高了 10.8%.

由以上实验数据可知,本文提出的动态分段充电法,提高了串联储能电容组的容量利用率,降低了充电过程中故障的风险.

### 3 结论

本文提出了一种基于动态分段法的超级电容充电控制策略.该策略分为分段恒流、阶梯恒压与浮充阶段.分段恒流阶段又分为启动、阶梯恒流和充电终止 3 个阶段.充电的各阶段由状态机控制,通过 4 种状态切换实现.

本文采用带有均压电路的仿真电容组模型充电验证本方法的特性.将动态分段法控制策略与普通 3 段法控制策略充电的容量利用率进行了比较分析.分析结果表明采用动态分段法充电控制策略充电比采用普通 3 段法充电的电容组容量利用率提高 4.98%,总储能提高了 10.8%.

仿真实验结果表明,本文提出的动态分段法充电策略提高串联超级电容组中的单体容量利用率,降低充电器与超级电容组在充电时失效的风险.在

超级电容规模化使用领域中具有应用意义.

### 4 参考文献

- [1] 于波.微网与储能系统容量优化规划[D].天津:天津大学,2012:67-68.
- [2] 代娟.超级电容智能充电机的研制[D].重庆:西南大学,2013:10-12.
- [3] 毛金勇.储能式城轨超级电容均压策略研究与充电系统研制[D].长沙:中南大学,2013:29-31.
- [4] 赵允刚,范永强,刘波峰.低地板车超级电容快速充电装置设计及仿真研究[J].科技资讯,2003,30(60):91-92.
- [5] 蒋玮,胡仁杰,张金龙.光伏直流系统中超级电容充电电路设计与分析[J].电源技术,2011,35(7):847-857.
- [6] 马鹏宇.超级电容混合动力汽车充电系统研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009:12-13.
- [7] 汪亚霖,文方.超级电容充电策略研究[J].机械工程与自动化,2002(5):170-171.
- [8] 袁斌,郝战,陈树越.基于 P89LPC938 的阀控式铅酸电池充电器检测系统[J].常州大学学报:自然科学版,2010,22(4):61-63.
- [9] 周小波,徐磊.超级电容充电系统的设计[J].阜阳师范学院学报:自然科学版,2013,30(4):36-39.
- [10] 陈体衍,甄春花.VRLA 蓄电池变电流间歇快速充电方法[J].蓄电池,1999(1):6-9.
- [11] 王库,冯义.快速充电技术的探讨[J].中国农业大学学报,2001,6(2):62-67.
- [12] 廖金华.一种针对铅酸蓄电池的新型智能三阶段充电系统的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2011:5-6.
- [13] 孟彦京,张商州,陈景文.充电方式对超级电容能量效

- 的影响 [J]. 电子器件, 2014, 37(1): 13-16.
- [14] Xu Qingshan, Bian Haihong, Zhao Weiran. EDLC charging performance for microgrid applications [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2010, 26(3): 415-420.
- [15] 王晗, 张建文, 蔡旭. 一种 PWM 整流器动态性能改进控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(S1): 194-202.
- [16] 于鹏, 杨仁刚. 超级电容串联储能系统的并联电容均压方法 [J]. 农业工程学报, 2014, 24: 133-140.

## The Charging Strategy Based on Dynamic Segmentation for Series Connected Supercapacitors

YU Peng<sup>1</sup>, YANG Rengang<sup>2\*</sup>

(1. College of Engineering, Bohai University, Jinzhou Liaoning 121013, China;

2. Information and Electrical Engineering, China Agricultural University College, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The drawback of charging strategy for series connected supercapacitors is that the available methods are high over voltage risk, low available rate of capacitance and poor adaptability. By enhancing current charging strategy, a supercapacitor charging strategy based on dynamic segmentation has been proposed. This strategy has the advantage that the available capacitance rate can be improved. The constant current charging step is divided to starting step, main constant current charging step and stair current step. The voltage of constant voltage step is dynamically decided by the voltage of cells. The transfer parameters of different step were computed, the state machine was designed to realize this strategy. The simulations are experimented with the model of series connected supercapacitors with balancing circuit. The simulation result proved that the voltage jumping up in the starting step and the voltage dropping are restrained. The strategy improve the available capacity rate of supercapacitors to 9%.

**Key words:** super capacitor; charging strategy; starting current; stair voltage

(责任编辑: 冉小晓)