

光伏发电系统中超级电容器充电策略

蒋 玮¹, 陈 武¹, 胡仁杰¹, 王晓东², 杨永标³

(1. 东南大学 电气工程学院 江苏省智能电网技术与装备重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 国网山西省电力公司长治供电公司, 山西 长治 046011;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 利用超级电容器改进型 RC 模型对不同充电方法下超级电容器的充电效率进行了分析。提出了基于 Boost 级联 Buck 变换器(BoCBB)的光伏电池对超级电容器充电系统, 前级 Boost 变换器与光伏发电系统连接, 使用改进型扰动观察法进行光伏电池的最大功率点跟踪控制, 后级 Buck 变换器使用分段式充电策略对超级电容器进行充电。基于该电路, 提出了完整的超级电容器充电系统控制方法。提出了使用等效电流源分别对 BOCBB 的前后级电路进行建模的方法, 基于该方法进行了充电系统主电路的建模以及电流环控制器设计。最后对不同光照情况下的光伏电池对超级电容器充电效率进行了仿真分析, 并搭建了实验平台, 通过 2 组对比实验, 验证所提出的充电策略能够有效提高光伏电池对超级电容器的充电效率。

关键词: 光伏发电系统; 超级电容器; 储能; 级联变换器; 充电; 效率; 光伏电池; 最大功率点跟踪

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.006

0 引言

在可再生能源发电系统, 如光伏发电系统和风力发电系统中配以一定容量的储能系统, 可以起到平滑功率、提供不间断供电等重要作用^[1-3]。超级电容器利用双电层原理直接储存电能, 其容量可达数万法拉, 是介于蓄电池和传统电容器之间的一种新型储能技术。超级电容器储能技术因为其功率密度高、低温性能好、循环寿命长和对环境无污染等特点得到了广泛的关注和应用^[4]。光伏发电系统和超级电容器储能系统配合, 可以利用超级电容器的大功率吞吐能力, 改善光伏发电系统整体特性^[5-7]。

光伏阵列输出功率随光照强度、环境温度以及输出电压不同而变化, 但在一定的照度和环境温度下只有一个最大功率点, 光伏电池的输出功率和电压随负载变化, 最大功率点跟踪(MPPT)控制通过动态改变等效负载以获取最大功率^[8-10]。

MPPT 控制多通过和光伏电池并联的单级 DC/DC 变换器实现, 但在此种控制方式下, 变换器输出直流母线电压会在一个范围内动态变化, 如果直接给超级电容器充电, 会造成在超级电容器端电压和母线电压差较大时, 充电电流过大, 在超级电容器等

效串联电阻上消耗的功率大, 充电效率很低^[11-12]。同时, 不同的充电方式对超级电容器的充电效率影响较大。本文在分析 3 种充电方式下光伏电池对超级电容器的充电效率的基础上, 选择 Boost 级联 Buck 变换器 BoCBB(Boost Cascaded Buck converter)并设计出优化的充电控制策略, 在实现光伏电池 MPPT 控制的同时完成对超级电容器的高效充电, 仿真和实验结果验证了所提出的充电控制策略的有效性。

1 超级电容器充电效率研究

1.1 超级电容器改进型 RC 模型

如图 1 所示, 超级电容器改进型 RC 模型由理想电容 C、串联等效电阻 R_s 和并联等效电阻 R_p 组成, 由于加入了表征超级电容器漏电流效应的并联等效电阻, 相对简单 RC 电路模型, 该模型能较精确地描述电容器的长期工作状态^[13-14]。

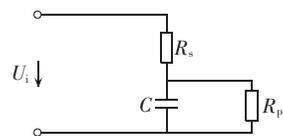


图 1 超级电容器的改进 RC 电路模型

Fig.1 Improved RC model of super capacitor

该模型电路属于一阶全响应电路, 通过求解一阶全响应解的公式, 可以获得初始电压为 U_i 时超级电容器改进 RC 电路模型中等效电容电压和输入电流表达式:

$$u_c(t) = \frac{R_p}{R_s + R_p} U_i (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1)$$

$$i_i(t) = \frac{U_i}{R_s + R_p} + \frac{1}{R_s} U_i e^{-t/\tau} \quad (2)$$

收稿日期: 2014-02-06; 修回日期: 2014-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407025); 国家电网公司科技项目(电网与用户双向互动服务能力提升关键技术研究资助)(526408130022); 江苏省科技支撑计划(社会发展)(BE-2013737)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407025), China State Grid Technology Program(Key Technology Research of Promotion of Two-Way Interaction Service Between Grid and User)(526408130022) and Jiangsu Province Science and Technology Support Program (Social Development)(BE2013737)

其中, $\tau = \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} C$ 。

1.2 恒压、恒流、恒功率下的充电效率

超级电容器的充电和蓄电池类似但是又有所不同,因为超级电容器的充放电过程不发生化学反应,所以在充放电过程中受老化影响很小,理论上充放电次数无限。同时,超级电容器本身作为能量缓冲器,对大的脉冲电流吸收效果较好。目前常用的超级电容器充电方式有恒压充电、恒流充电、恒功率充电、脉冲充电等^[15]。

利用式(1)、(2),可计算出改进 RC 模型中电容 C 所存储的电能 W_c 和整个等效模型所吸收的电能 W_i ,从而可以获得恒压充电方式下的充电效率 η_{cv} 和恒流充电方式下的充电效率 η_{cc} :

$$\eta_{cc} = \frac{W_c}{W_i} = \frac{1}{2} \frac{R_p^2 C}{(R_s + R_p)[T + R_p C(1 - e^{-T/\tau})]} (1 - e^{-T/\tau}) \quad (3)$$

$$\eta_{cv} = \frac{W_c}{W_i} = \frac{1}{2} \frac{R_p^2 C(1 - e^{-T/\tau})^2}{(R_s + R_p)T - R_p^2 C(1 - e^{-T/\tau})} \quad (4)$$

在恒功率充电方式下,超级电容器端电压的微分方程是一个一阶非线性微分方程,较难求解,可通过改进 RC 电路模型中电容 C 的端电压和输入电流之间的关系:

$$u_c(T) = \frac{e^{-t/(R_p C)}}{C} \int_0^T i_i(t) e^{t/(R_p C)} dt \quad (5)$$

使用分段线性逼近的方法,计算恒功率充电方式下的充电效率 η_{cp} 。

由此可以获得恒压、恒流和恒功率充电方式下充电效率曲线,分别如图 2—4 所示。通过对效率曲线的分析可以看出,超级电容器的恒压充电方式实现容易,但充电效率低,最多只有 50%;恒流充电方式下,充电速度快,随着时间的延长,充电效率逐渐提高,最终充电效率可超过 90%,但充电电路功率随超级电容器电压上升而增大,对充电电路功率要求高;恒功率充电方式下,充电效率随超级电容器电压上升而提高,最终略高于恒流充电,但充电开始时由于端电压低导致充电电流大,对充电电路的电流应力要求较高。

对于超级电容器恒压、恒流、恒功率充电方式的比较可以看出,不同的充电方式各具优点和缺点,在不同的阶段应使用不同的充电方式。

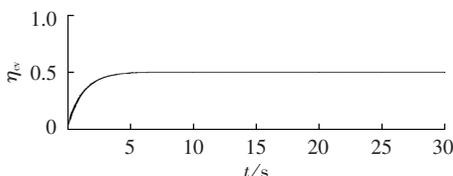


图 2 恒压充电效率曲线

Fig.2 Efficiency curve of constant voltage charging

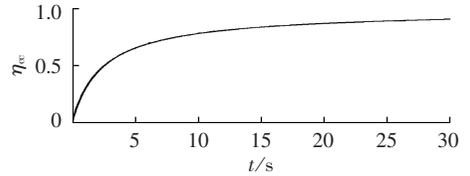


图 3 恒流充电效率曲线

Fig.3 Efficiency curve of constant current charging

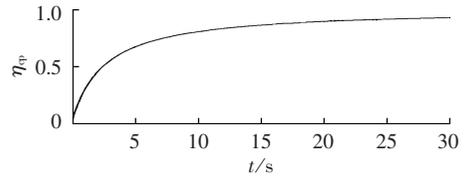


图 4 恒功率充电效率曲线

Fig.4 Efficiency curve of constant power charging

2 充电系统结构和控制策略

2.1 充电系统结构

工作在 MPPT 状态下的单级 DC/DC 变换器只能使光伏发电系统产生最大功率,而无法对变换器输出电压进行控制,也就无法根据不同的充电阶段对超级电容器采用不同的充电方式。而采用变换器级联的方式,可以通过对前后级变换器使用不同的控制策略,达到不同的控制目标^[16]。基于此思路,本文提出了基于 BoCBB 的光伏发电系统对超级电容器储能系统的充电电路,如图 5 所示。

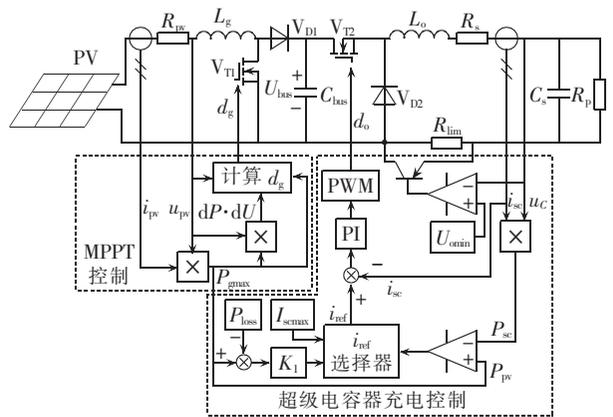


图 5 光伏电池对超级电容器的充电系统结构

Fig.5 Structure of charging system of photovoltaic cell to super capacitor

图中, R_{pv} 为光伏电池等效输入电阻, L_g 、 V_{T1} 、 V_{D1} 、 C_{bus} 构成前级 Boost 变换器, C_{bus} 、 V_{T2} 、 V_{D2} 、 L_o 构成后级 Buck 变换器, R_s 、 R_p 和 C_s 为使用改进 RC 模型描述的超级电容器,前后级变换器共用直流母线电压为 U_{bus} 。Boost 变换器使用 MPPT 控制策略进行控制, Buck 变换器对超级电容器进行充电控制。

2.2 MPPT 控制

如图 6 所示,光伏电池输出功率随端电压的变化呈单峰特性,峰值即为最大功率点。充电系统中的

MPPT 控制使用改进型扰动观察法,其原理是根据光伏电池输出功率变化方向增加或减小 Boost 变换器中 V_{T1} 的占空比 d_g ,增减的步长随光伏电池输出功率和端口电压微分量的比值 dP/dU 的大小动态变化。在图 6 中,在离最大功率点较远的 A、B 点, dP/dU 较大,则步长较大,可实现快速跟踪;在 C 点的时候 dP/dU 较小,步长减小。越靠近最大功率点步长越小,最后实现在其两边以很小的幅度振荡。

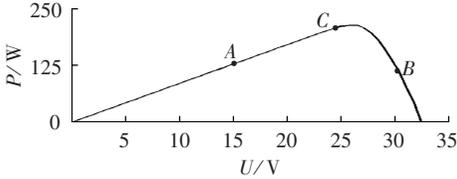


图 6 光伏电池功率-电压特性曲线
Fig.6 Power-voltage characteristic curve of photovoltaic cell

2.3 超级电容器充电控制策略

在充电开始时,因为超级电容器端电压很低,而其等效串联电阻 R_s 较小,当很大的充电功率加在超级电容器上,会导致瞬间充电电流极大,如果超过其最大充电电流 I_{scmax} ,则可能导致超级电容器的损坏,因此在充电初期,需要将后级 Buck 变换器输出电压限制在 $U_0 < I_{scmax} R_s$,根据 Buck 变换器的电压变比,需要将 V_{T2} 占空比限制在:

$$d_o < \frac{U_0}{U_{bus}} \quad (6)$$

由于 V_{T2} 的占空比 d_o 存在最小值 d_{omin} ,仅依靠占空比的调节无法在充电初期限制充电电流。在启动时间短、输出功率不大时,可使用限流电阻的能耗型软启动方式,对变换器的效率影响不大^[17],因此在充电最初阶段,使用软启动充电方式,通过串联限流电阻 R_{lim} 对超级电容器进行充电, R_{lim} 应满足:

$$R_{lim} \geq \frac{U_{omin} - R_s I_{scmax}}{I_{scmax}} \quad (7)$$

其中, $U_{omin} = d_{omin} U_{bus}$,当超级电容器端电压 u_c 达到 U_{omin} 后,将限流电阻短路。

软启动阶段结束后,进入恒流充电阶段,充电控制系统检测光伏电池输出的电压 u_{pv} 和电流 i_{pv} ,从而计算出输出功率 P_{gmax} 。随着超级电容器端电压 u_c 的上升,其能够承受的最大充电功率 $P_{scmax} = u_c I_{scmax}$ 也在不断提高,但恒流充电阶段,由于 $P_{scmax} < P_{gmax}$ 时,超级电容器不能在最大充电电流范围内吸收所有由光伏电池产生的功率,此时需要通过控制 Buck 变换器将充电电流限制在 I_{scmax} 。

随着超级电容器电压继续升高,当 $P_{scmax} \geq P_{gmax}$ 后,超级电容器能够在最大充电电流范围内吸收由光伏电池产生的全部功率,充电过程进入恒功率充电阶段,充电系统采集超级电容器充电电流 i_{sc} 和端电压 u_c ,计算出的超级电容器当前充电功率和光伏

电池在最大功率控制下产生的功率 P_{gmax} 及损耗功率 P_{loss} 之差 ΔP ,乘以比例系数 K_1 ,作为 Buck 变换器输出电感电流 i_{sc} 的参考值 i_{ref} ,通过 PI 控制器产生占空比控制信号 d_o 控制 V_{T2} 以控制充电电流。

3 BoCBB 建模与控制器设计

3.1 BoCBB 的建模

在恒流充电阶段和恒功率充电阶段,Buck 变换器的控制对象都是输出电流。建立 BoCBB 的数学模型是控制系统设计的依据。BoCBB 中的 Boost 和 Buck 变换器共用一个直流母线电容,2 个开关管使用不同算法分别控制,不存在互补的关系。但是如果将 BoCBB 作为一个整体建模,在一个变换器模型中包含 2 个完全独立占空比,将会使该数学模型结构复杂,因此考虑将前后级变换器进行解耦后建模。

图 7 所示的是 BoCBB 对超级电容器充电电路的等效电路图,对前级输出电流 i_d 和后级输入电流 i_s 进行平均化后,可以得到直流母线电容 C_d 在一个开关周期内的平均电流和电压:

$$\bar{i}_c = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} C_d \frac{du_{Cd}}{dt} dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} (i_d - i_s) dt = \frac{1}{T_s} \left[\int_0^{T_1} (-i_s) dt + \int_{T_1}^{T_2} (i_d - i_s) dt + \int_{T_2}^{T_3} i_d dt \right] \quad (8)$$

$$C_d \frac{d\bar{u}_{Cd}}{dt} = \bar{i}_{Lg}(1 - d_g) - \bar{i}_s = \bar{i}_d - \bar{i}_{L0} d_o \quad (9)$$

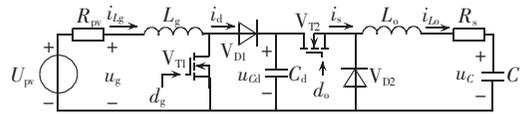


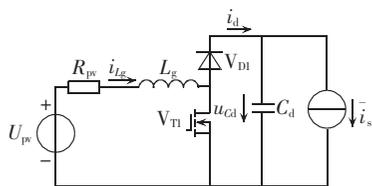
图 7 BoCBB 等效电路

Fig.7 Equivalent circuit of BoCBB

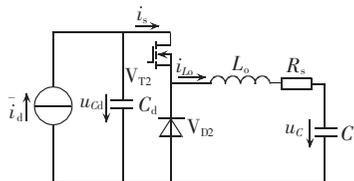
Boost 和 Buck 变换器开关周期同为 T_s , \bar{i}_c 为 C_d 在一个开关周期中流过电流的平均值, \bar{u}_{Cd} 是 C_d 上的平均电压, d_g 和 d_o 分别是 V_{T1} 和 V_{T2} 的占空比。式(9)中, C_d 上的电压可以用流过 V_{D1} 、 V_{T2} 的平均电流 \bar{i}_d 和 \bar{i}_s 来表示,且有 $\bar{i}_d = (1 - d_g) \bar{i}_{Lg}$, $\bar{i}_s = d_o \bar{i}_{L0}$ 。这意味着 Boost 和 Buck 变换器可以用与其输出平均电流相等的恒流源替代,因此 BoCBB 可以使用一个 Boost 变换器并联恒流源 \bar{i}_s 或者 Buck 变换器并联恒流源 \bar{i}_d 来等效,并分别使用状态空间平均法建模,等效电路如图 8 所示。

由图 8(b)可得 Buck 变换器+恒流源的状态空间平均方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L0} \\ \dot{u}_{Cd} \\ \dot{u}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_0} & \frac{d_o}{L_0} & -\frac{1}{L_0} \\ -\frac{d_o}{C_d} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L0} \\ u_{Cd} \\ u_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_d} \\ 0 \end{bmatrix} \bar{i}_d \quad (10)$$



(a) Boost 变换器+恒流源



(b) Buck 变换器+恒流源

图 8 BoCBB 解耦等效电路图

Fig.8 Decoupled equivalent circuit of BoCBB

对状态变量和占空比加入小信号扰动:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{L_o} \\ u_{Cd} \\ \hat{u}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{L_o} \\ U_{Cd} \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{i}_{L_o} \\ \hat{u}_{Cd} \\ \hat{u}_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$d_o = D_o + \hat{d}_o \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(10),可以得到变换器的交流小信号状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{L_o} \\ \dot{\hat{u}}_{Cd} \\ \dot{\hat{u}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_o} & \frac{D_o}{L_o} & -\frac{1}{L_o} \\ -\frac{D_o}{C_d} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L_o} \\ \hat{u}_{Cd} \\ \hat{u}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_d} \\ 0 \end{bmatrix} \hat{i}_d + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_o} & 0 \\ -\frac{1}{C_d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L_o} \\ U_{Cd} \\ U_c \end{bmatrix} \hat{d}_o \quad (13)$$

通过对式(10)进行拉普拉斯变换,可以得到如下传递函数:

$$G_{ido}(s) = \frac{\hat{i}_{L_o}(s)}{\hat{d}_o(s)} = \frac{C_d^2 C U_{Cd} s^2 + L_o C D_o I_{L_o} s}{C C_d^2 L_o s^3 + C C_d^2 s^2 + C_d (D_o^2 C + C_d) s} \quad (14)$$

$$G_{ud}(s) = \frac{\hat{u}_{Cd}(s)}{\hat{d}_o(s)} = \frac{-C L_o I_{L_o} s^2 + (C C_d D_o U_{Cd} - C L_o R_s) s - L_o I_{L_o}}{C C_d^2 L_o s^3 + C C_d L_o s^2 + (D_o^2 C + C_d) L_o s} \quad (15)$$

3.2 电流控制器设计

扰动作用下的恒功率控制器电流环如图 9 所示,其中 $G_{ido}(s)$ 为式(14)中的占空比对电感电流的传递函数, $G_{cl}(s)$ 是要设计的电流补偿控制器, $N(s)$ 为外部扰动。

Buck 级仿真参数如下:直流母线电容量 $C_d = 2000 \mu\text{F}$, 超级电容器模组容量 $C_s = 55 \text{ F}$, 输出滤波

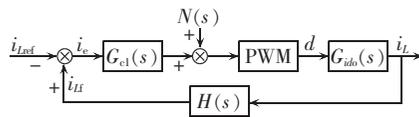


图 9 扰动作用下的电感电流环

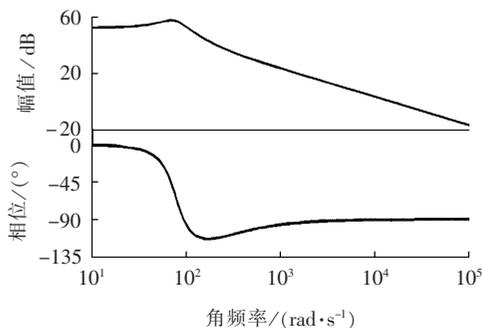
Fig.9 Inductive current loop with perturbation

电感量 $L_o = 0.02 \text{ H}$, Buck 变换器占空比 $d_o = 0.5$, 直流母线电容稳态电压 $U_{Cd} = 300 \text{ V}$, 输出滤波电感稳态电流 $I_{L_o} = 20 \text{ A}$, 开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 。将仿真参数代入式(14),可以得到占空比-输出电流传递函数:

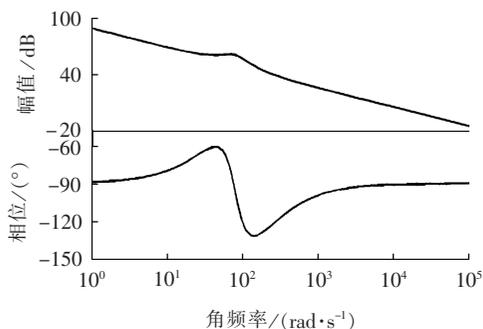
$$G_{ido}(s) = \frac{0.066 s^2 + 11 s}{4.4 \times 10^{-6} s^3 + 0.22 \times 10^{-3} s^2 + 0.0275 s} \quad (16)$$

占空比-输出电流传递函数波特图如图 10(a)所示。从图中可以看出,开环传递函数频率特性的相移小于 -180° , 因此对于电流内环,理论上对于任何开环增益,幅值裕度均大于零,系统为无条件稳定的。但在低频段幅频特性为一常数,系统存在稳态误差,可以求得电流环开环直流增益 $A_{DC} = 399.94$, 系统稳态误差为 $1/(1+A_{DC}) = 0.25\%$ 。为了消除稳态误差,同时考虑对系统噪声以及参数变化的抑制,选择电流补偿器 $G_{cl}(s)$ 为 PI 环节,其传递函数为 $G_{cl}(s) = K_{cl} \left(1 + \frac{1}{T_{cl} s} \right)$, 通过在低频段增加 1 个极点,以改善系统的稳态误差。加入 PI 环节后,电流环开环传递函数变为:

$$G_w(s) = G_{cl}(s) K_{PWM} G_{ido}(s) = \frac{K_{PWM} (K_{cl} T_{cl} s + 1) (C_d^2 C U_{Cd} s^2 + L_o C D_o I_{L_o} s)}{T_{cl} C C_d^2 L_o s^4 + T_{cl} C C_d^2 s^3 + T_{cl} C_d (D_o^2 C + C_d) s^2} \quad (17)$$



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 10 控制环节的波特图

Fig.10 Bode diagrams of control loop

取比例系数 $K_{cl} = 1.35$ 、积分系数 $T_{cl} = 0.02$, 电流环开环传递函数如式(18)所示:

$$G_{cl}(s)K_{PWM}G_{ido}(s) = \frac{0.00528s^3 + 1.144s^2 + 44s}{8.8 \times 10^{-8}s^4 + 4.4 \times 10^{-6}s^3 + 0.55 \times 10^{-3}s^2} \quad (18)$$

加入 PI 环节后的占空比-电流波特图如图 10 (b)所示,从图中可以看出,低频段以 $-20 \text{ dB}/(^{\circ})$ 下降,直流增益无限大,系统消除了稳态误差,穿越频率为 3.3 kHz ,是开关频率 f_s 的 $1/6$ 左右,开环传递函数频率特性的相移仍然小于 -180° 。

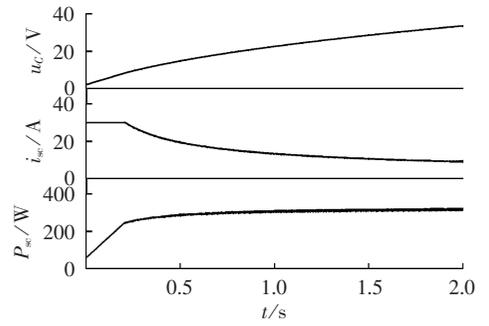
4 充电策略验证

4.1 仿真验证

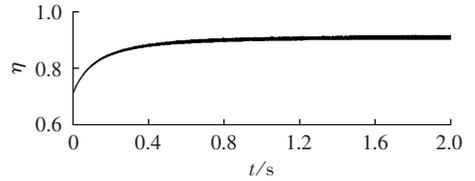
在 MATLAB/Simulink 中构建了光伏电池对超级电容器充电系统仿真模型,使用 BoCBB,前一级 Boost 变换器使用 MPPT 控制器控制跟踪最大功率点,后一级 Buck 控制器控制对超级电容器的充电。仿真参数如下:光伏电池环境温度 $T = 20^{\circ}\text{C}$,光照强度 $S = 180 \text{ W}/\text{m}^2$,输入电感量 $L_g = 0.01 \text{ H}$,输出电感量 $L_o = 0.02 \text{ H}$,直流母线电容量 $C_d = 4000 \mu\text{F}$,超级电容器等效串联电阻 $R_s = 60 \text{ m}\Omega$,超级电容器电容量 $C_s = 1 \text{ F}$,开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 。

MPPT 充电控制器使用之前描述的控制器的设计方法设计了电流环补偿环节,PI 控制器的比例系数 K_{cl} 为 4,积分系数 T_{cl} 为 0.02,设定充电功率为 MPPT 控制器追踪到的最大功率点功率的 90%。设开关管的最小占空比 $d_{\text{min}} = 0.03$,最大充电电流 $I_{\text{scmax}} = 30 \text{ A}$,Buck 变换器输入电压 $U_{\text{bus}} = 150 \text{ V}$,输出最小电压为 $U_{\text{omin}} > 4.6 \text{ V}$,取 $U_{\text{omin}} = 5 \text{ V}$,由式(7)可得限流电阻 $R_{\text{lim}} > 0.1067 \Omega$,取 $R_{\text{lim}} = 0.3 \Omega$ 。首先在恒定光照强度 $180 \text{ W}/\text{m}^2$ 下对 MPPT 控制器进行了 2 s 的仿真,超级电容器端电压、充电电流和充电功率波形如图 11 (a)所示,可以看出在超级电容器端电压达到 $U_C = 10 \text{ V}$ 之前,处于软启动和恒流充电阶段,在限流电阻和恒流控制的共同作用下,实际上超级电容器是以 $I_{\text{scmax}} = 30 \text{ A}$ 恒流充电,软启动阶段的限流电阻起到了在超级电容器端电压很低的情况下限制充电电流的作用;在超级电容器端电压达到 $U_C = 10 \text{ V}$ 之后,开始恒功率充电,最终充电功率稳定在 315 W ,为光伏电池输出最大功率的 90%。图 11(b)所示的是这一过程中的充电效率,充电效率在充电初期较低,最终随着超级电容器电压的升高,充电效率稳定在 90% 以上。

在 0 s 、 2 s 、 4 s 分别设定光照强度为 $150 \text{ W}/\text{m}^2$ 、 $200 \text{ W}/\text{m}^2$ 、 $300 \text{ W}/\text{m}^2$,获得的光伏电池输出功率 P_{mppt} 和超级电容器充电功率 P_{sc} 如图 12 所示,可以看出,使用本文提出的充电策略对超级电容器进行充电,超级电容器的充电功率可以快速跟踪光伏电池输出的最大功率,从而大幅提高充电效率。



(a) 充电电压、电流、功率波形



(b) 充电效率波形

图 11 超级电容器充电波形

Fig.11 Charging waveforms of super capacitor

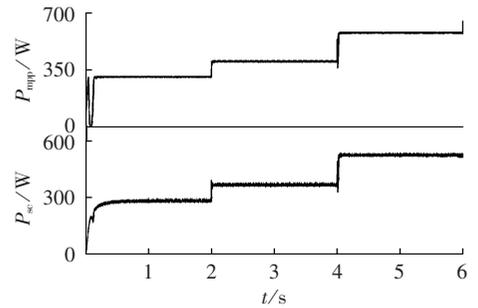


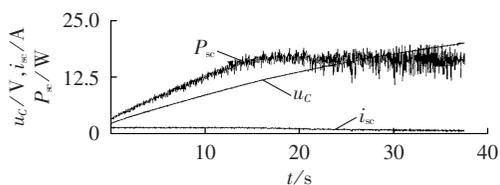
图 12 光照强度变化时光伏电池输出最大功率和超级电容器充电功率

Fig.12 Maximum photovoltaic cell output power and super capacitor charging power under varying illumination intensity

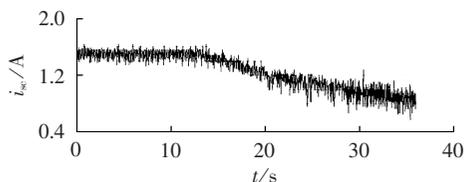
4.2 实验验证

搭建了实验平台对额定电压 U_{CN} 为 20 V 、容量为 2 F 的超级电容器组进行了充电实验。实验分为 2 组:第 1 组控制光伏组件输出最大功率为 $P_{\text{gmax}1} = 17 \text{ W}$,超级电容器模组的最大充电电流设为 $I_{\text{scmax}1} = 1.5 \text{ A}$;第 2 组控制光伏组件输出最大功率为 $P_{\text{gmax}2} = 30 \text{ W}$,超级电容器模组的最大充电电流设为 $I_{\text{scmax}2} = 2 \text{ A}$ 。设 Buck 部分输出最小电压 $U_{\text{omin}} = 5 \text{ V}$,超级电容器内阻为 0.6 ,由式(7)得到限流电阻 $R_{\text{lim}} > 2.733 \Omega$,实际实验过程中取 $R_{\text{lim}} = 4 \Omega$ 。

第 1 组实验波形如图 13 所示。充电开始时超级电容器模组端电压为 2.486 V ,充电结束时为 20 V ;总充电时间为 36.32 s ,其中恒流充电 14.11 s ,恒功率充电 22.21 s ;总充电效率为 74.03% 。如果使用光伏输出功率所允许的最大充电电流进行恒流充电,即 $i_{\text{sc}} = P_{\text{gmax}} / U_{CN} = 17 / 20 = 0.85 \text{ (A)}$,则充电时间需要 41.21 s ,充电效率为 56.21% ,由此可见,采用最大功率转移充电方式可以有效提高光伏电池对超级电



(a) 充电电压、电流、功率波形



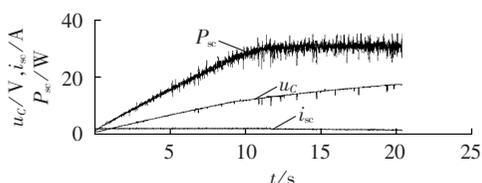
(b) 充电电流放大波形

图13 第1组实验波形

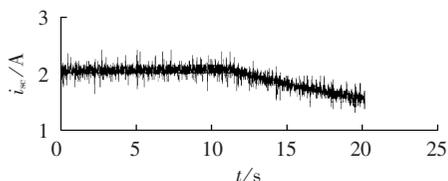
Fig.13 Waveforms of experiment group 1

容器的充电效率并缩短充电时间。

第2组实验波形如图14所示。在超级电容端电压 $u_c < 5\text{ V}$ 时,使用限流电阻进行充电;在 $5\text{ V} \leq u_c < 12.5\text{ V}$ 时,使用最大充电电流 2 A 恒流向超级电容器进行充电;在 $u_c \geq 12.5\text{ V}$ 后,使用恒功率方式充电,充电功率为 30 W 。充电开始时超级电容器模组端电压为 0.86 V ,充电结束时为 20 V 。由于充电功率和充电电流的提高,总充电时间缩短到了 20.79 s ,其中恒流充电 11.84 s ,恒功率充电 8.95 s ,总充电效率下降为 64.01% 。这是恒流充电时间占整体充电时间增加、恒功率充电时间减少导致的。因此,在光伏电池产生功率增加的情况下,超级电容器模组的最大充电电流也应增加,以减少恒流充电时间,这就需要提高均压电路的分流能力。



(a) 充电电压、电流、功率波形



(b) 充电电流放大波形

图14 第2组实验波形

Fig.14 Waveforms of experiment group 2

5 结论

本文在超级电容器改进 RC 模型基础上,采用数值方法计算并比较了不同模式下超级电容器充电的效率。结果显示恒流充电和恒功率充电方式在充

电效率上优于恒压充电方式,而当使用光伏发电系统对超级电容器储能系统进行充电时,恒功率充电方式较之恒流充电方式更合适。提出了使用 BoCBB 实现对光伏发电系统的 MPPT 控制,同时通过在不同阶段控制超级电容器的充电方式从而提高充电效率,并使用等效电流源法对 BoCBB 进行了建模,在小信号模型的基础上设计了电流环控制器。着重分析了充电开始时的限流问题。仿真和样机实验表明本文提出的充电策略能够有效地提高光伏电池对超级电容器的充电效率,具有实用意义。

参考文献:

- [1] 张卫东,刘祖明,申兰先. 利用储能平抑波动的光伏柔性并网研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):106-111.
ZHANG Weidong,LIU Zuming,SHEN Lanxian. Flexible grid-connection of photovoltaic power generation system with energy storage system for fluctuation smoothing[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):106-111.
- [2] 于芑,赵瑜,周玮,等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24):35-40.
YU Peng,ZHAO Yu,ZHOU Wei,et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control,2011,39(24):35-40.
- [3] 蒋平,熊华川. 混合储能系统平抑风力发电输出功率波动控制方法设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):94-98.
JIANG Ping,XIONG Huachuan. A control scheme design for smoothing wind power fluctuation with hybrid energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):94-98.
- [4] 张慧妍,程楠,景阳. 超级电容器储能系统的应用研究综述[J]. 电力电子技术,2011,45(12):51-53.
ZHANG Huiyan,CHENG Nan,JING Yang. A review of super capacitor energy storage system application research[J]. Power Electronics,2011,45(12):51-53.
- [5] 鲍雪娜,张建成,徐明,等. 基于混合储能的并网光伏电站有功分级控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):115-121.
BAO Xuena,ZHANG Jiancheng,XU Ming,et al. Active power hierarchical control strategy of interconnected photovoltaic station based on hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):115-121.
- [6] 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.
- [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 Guoju,TANG Xisheng,QI Zhiping. Design for a novel low-voltage compensation device fit for rural power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(20):24-28.
- [8] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005:117-130.
- [9] CARRASCO J M,FRANQUELO L G,BIALASIEWICZ J T,et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable

- energy sources;a survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [10] 唐磊,曾成碧,徐伟,等. 一种新颖的光伏自适应变步长最大功率点跟踪算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 128-133.
TANG Lei, ZENG Chengbi, XU Wei, et al. Variable-step adaptive MPPT algorithm for photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 128-133.
- [11] 陈维,沈辉. 带蓄电池的光伏系统中 MPPT 充电效果理论分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(12): 1196-1120.
CHEN Wei, SHEN Hui. Investigation on function of MPPT for photovoltaic system with storage battery[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2006, 27(12): 1196-1120.
- [12] KIM Younghyun, CHANG Naehyuck, WANG Yanzhi, et al. Maximum power transfer tracking for a photovoltaic-supercapacitor energy system[C]//IEEE ISLPED 2010. Austin, USA: IEEE, 2010: 307-312.
- [13] 易桂平,胡仁杰. 基于超级电容储能系统的动态电压恢复器研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 21-26.
YI Guiping, HU Renjie. Dynamic voltage restorer based on super capacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 21-26.
- [14] 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.
- [15] 张慧妍. 超级电容器直流储能系统分析与控制技术的研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2006.
ZHANG Huiyan. Research on the analysis and control strategy of ultracapacitor DC storage energy system application[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [16] CHEN Jingquan, MAKSIMOVIC D, ERICKSON R. Buck-Boost PWM converters having two independently controlled switches [C]//IEEE PESC 2001. Cairns, Australia: IEEE, 2001: 736-741.
- [17] MUTOH N, KUBOTA K. PV systems to charge electric energy acquired through MPPT control to EDLCs efficiently and to handle the charged electric power effectively[C]//IEEE IECON 2008. Orlando, USA: IEEE, 2008: 2212-2217.

作者简介:



蒋 玮(1982—),男,江苏盐城人,讲师,博士,主要研究方向为电力电子技术及其在微电网中的应用(E-mail:jiangwei@seu.edu.cn)。

Charging strategy for super capacitor of photovoltaic generation system

JIANG Wei¹, CHEN Wu¹, HU Renjie¹, WANG Xiaodong², YANG Yongbiao³

(1. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology & Equipment, School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Changzhi Electric Power Supply Company, Changzhi 046011, China;

3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The improved RC model of super capacitor is applied in the analysis of its charging efficiency for different charging methods. A super capacitor charging system based on BoCBB (Boost Cascaded Buck converter) is proposed for photovoltaic power generation system and a complete control strategy is designed for it. The Boost converter is connected to photovoltaic system and an improved perturb-observe method is adopted to track the maximum power point. A multi-step charging strategy is adopted to charge the super capacitor by the Buck converter. The concept of equivalent current source is applied in the modeling of BoCBB front and back stages, based on which, the main circuits of charging system are modeled and the controller of current loop is designed. The charging efficiency of photovoltaic cell to super capacitor is simulated for different illumination intensities. A test platform is built and the comparative experiment shows the proposed charging strategy improves the charging efficiency effectively.

Key words: photovoltaic generation system; super capacitor; energy storage; cascaded converter; charging; efficiency; photovoltaic cells; maximum power point tracking