

基于电池组级联的高压恒流电源电流控制方法研究

谭 强^{1,2}, 高迎慧^{1,2}, 刘 坤^{1,2}, 韩 静^{1,2}, 孙鹁鸿^{1,2}, 严 萍^{1,2}

(1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 稳定的电流控制和精确的电压控制是高压恒流(HCC)充电电源控制系统的关键技术。本文基于电池组级联(BPCSs)的 HCC 充电电源提出了一种新的电流闭环的控制方法。该方法采用时序重构前移算法来提高充电的最大电流,实现了电流平均值的增大。文中首先建立了基于 BPCSs 的 HCC 充电电源充电系统的理论模型,并给出了其充电系统的电压控制方法和电流控制方法。其次,通过在 PSIM 仿真软件中建立仿真模型,验证了该方法的有效性。最后,基于仿真结果,设计了样机实验,实验结果验证了该方法的工程应用可行性。该方法保证了充电电流既能达到峰值,又能维持其稳定性,从而增大了电流的平均值,具有缩短充电时间、提高 HCC 充电电源充电速度的特点。

关键词: 电池组; 充电时间; 电流控制; 电压控制; 平均电流

DOI: 10.12067/ATEEE2003014 **文章编号:** 1003-3076(2020)09-0048-08 **中图分类号:** TM8

1 引言

高压恒流(High-voltage and Constant Current, HCC)充电电源广泛应用于智能电网、智能电动汽车和电火花震源及放电等领域^[1-3]。以市电作为初级能源的 HCC 充电电源在实验室及工业生产现场获得广泛使用,但是很难满足兆瓦级高功率野外作业需要。采用电池组、电力电子器件和脉冲电容器组成的 HCC 充电电源既能实现可移动的兆瓦级供电需求,又能间歇性地为负载提供能量,更重要的是还有利于实现系统的小型化,这对于兆瓦级电源系统来说至关重要。HCC 充电电源电路结构如图 1(a)所示。初级能源由电池组提供,并通过电力电子能量变换装置变为高压直流后传输给电容器,实现能量的高效传递。

串联谐振电路,buck 电路和基于电池组级联(Battery Packs Connected in Series, BPCSs)的 HCC 充电电路是常用的脉冲电容器充电拓扑电路^[4-7]。串联谐振电路如图 1(b)所示,其技术成熟,但是充电功率小,能量密度低,并联使用后可以实现充电功

率的增大,但要实现轻量化、小型化的设计指标,其体积相对来说还是很大^[8, 9]。buck 电路如图 1(c)所示,具有功率密度高、体积小等优势,缺点是同时满足高频、高压、大电流三个技术指标的限流电感增加,电流控制精度降低^[10]。基于 BPCSs 的 HCC 充电电路是一种新型的恒流充电电路^[11]。其电路拓扑如图 1(d)所示,在给脉冲电容器充电过程中,电池组首先通过不同开关的通断按顺序串联到主电路上,然后用这些电池组直接给脉冲电容器充电,而不必经过电力电子器件的高频变换,这种方式充电速度快、损耗低,有利于实现系统小型化。

基于 BPCSs 的 HCC 充电电源具有充电功率大(兆瓦级)和功率密度高的优势,并且在激光发射的重频测试中具有较高的应用价值。目前基于 BPCSs 的 HCC 充电电源电流控制策略应用广泛^[11-17]。李超、龙鑫林^[11, 12, 15]等采用时序重构法来进行电流的控制,即先根据第一级电池组串入回路所达到的最大电流为基准,当监测到下一个电池组被触发来维持的最大电流仍然和此时回路能达到的最大电流一

收稿日期: 2020-04-09
基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5419-201940218A-0-0-00)
作者简介: 谭 强(1990-),男,河南籍,博士研究生,研究方向为脉冲电源、电池储能应用和电力电子变换器;
孙鹁鸿(1968-),男,安徽籍,研究员,博士生导师,主要从事高压大电流脉冲放电技术、特种电源技术及应用研究(通讯作者)。

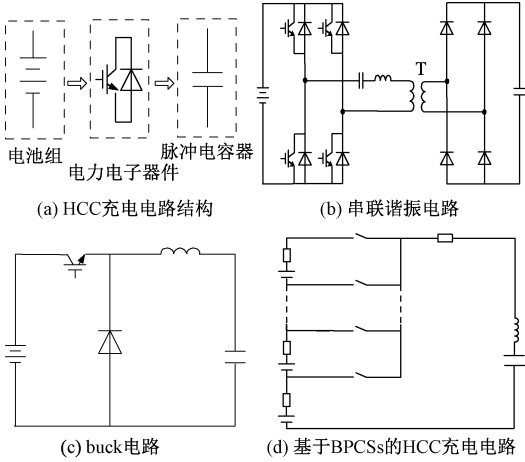


图1 常用HCC充电电源电路结构
Fig.1 Structure of HCC charging power supply

致时,选取此时刻为下一个蓄电池组被触发的时间。通过控制策略的实施有效完成了混合储能系统的高效能量转移。同样针对电流控制,刘坤^[16,17]初步研究了电压源串联拓扑结合级联控制方式实现的高压恒流电源,针对一个十级的电池组串联充电电源,通过设置电池组投入的间隔时间相同,保证每级电池组投入后回路电流的一致性,得到了良好的实验结果。通过分析发现如果第一级的电流较小时,之后的充电电流就会受初始最大电流的限制,这样就会造成电流的平均值较小,充电时间长,充电速度较慢,系统的性能不能得到充分利用,针对这一问题本文提出了一种时序重构前移算法来提高充电的最大电流,实现了电流平均值的增大。仿真和实验证明了该方法的有效性。

2 数学模型的建立和控制方法

基于BPCSs的HCC充电电源通常包括电池组级联模块、负载和控制系统。每级电池组级联模块包括一个电池组、一个开关器件IGBT和一个并联的二极管。通过把一级一级的电池组级联模块串联起来,可以得到其拓扑电路如图2所示。其中, $E_1 \sim E_n$ 为电池组,其电压值 $E_1 = E_n = e$,每级电池组的等效内阻为 R_0 ,等效电感为 L_0 , $D_1 \sim D_n$ 为二极管, $S_1 \sim S_n$ 为可精确控制开关时刻的IGBT,二极管与IGBT共同组成高压开关组件, L 为回路电感, R 为回路电阻, C 为脉冲电容器, U_c 为脉冲电容两端电压, I 为回路电流。

基于BPCSs的HCC充电电源的工作原理为:控制系统首先打开第一级电池组级联模块的开关

S_1 ,使得这一级电池组级联模块放电并经由其他级的旁路二极管给脉冲电容器 C 充电,当电容器的电压达到适当的值时,控制系统通过接通 S_2 将第二级电池组级联模块也串联到电路上。随着其余电池组依次串联到主电路中,脉冲电容器的电压迅速增加。当电容器的充电电压达到设定值时,控制系统关闭所有开关器件IGBT以结束充电过程^[12],如图3所示为级联充电过程中电容器电压和回路电流的波形示意图。

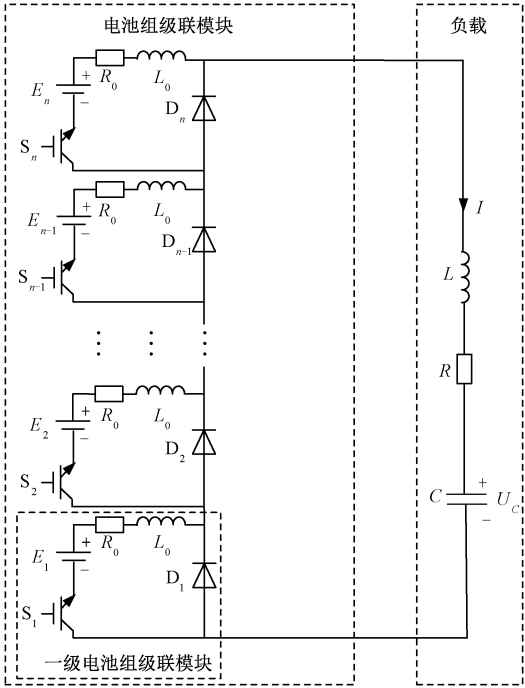


图2 基于BPCSs的HCC充电电源电路图
Fig.2 Circuit of HCC charging power supply based on BPCSs

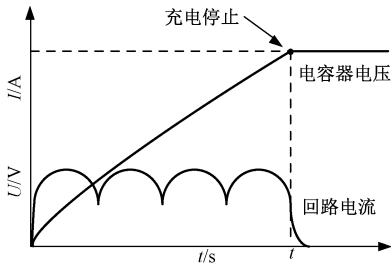


图3 级联充电电压电流波形
Fig.3 Waveforms of voltage and current based on BPCSs circuit

2.1 数学模型建立

参考电路分析过程,考虑到IGBT和二极管上产生的管压降,基于BPCSs的HCC充电电源电路结构可简化为图4,假设 t_{n-1} 时刻有 n 级电池组串入回路中,此时电池组两端的电压为 ne ,串入回路中的所有

IGBT 的管压降为 nU_{IGBT} , 假设 N 为电池组的总级数, 则回路二极管的总压降为 $(N-n)U_D$, L_n 为整个回路的等效电感, R_n 为整个回路的等效电阻。可以列写 t_{n-1} 时刻第 n 组电池组接入时, 上述简化电路的电压平衡方程:

$$L_n C \frac{d^2 U_C}{dt^2} + CR_n \frac{dU_C}{dt} + U_C = E \quad (1)$$

其中

$$R_n = nR_0 + R \quad (2)$$

$$L_n = nL_0 + L \quad (3)$$

$$E = ne - nU_{\text{IGBT}} - (N-n)U_D \quad (4)$$

得常数齐次线性微分方程的特征方程:

$$L_n CP^2 + CR_n P + 1 = 0 \quad (5)$$

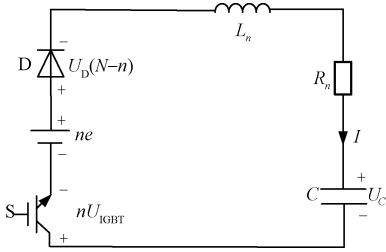


图4 电路简化图

Fig.4 Equivalent circuit

当电路满足过阻尼条件 $R_n > 2\sqrt{L_n/C}$ 时, 为非振荡充电过程, 电容器两端电压以及回路电流为:

$$U_C(t) = A_1 e^{p_1(t-t_{n-1})} + A_2 e^{p_2(t-t_{n-1})} + E \quad (6)$$

$$I(t) = C[A_1 P_1 e^{p_1(t-t_{n-1})} + A_2 P_2 e^{p_2(t-t_{n-1})}] \quad (7)$$

其中

$$P_1 = -\frac{R_n}{2L_n} + \sqrt{\left(\frac{R_n}{2L_n}\right)^2 - \frac{1}{L_n C}} \quad (8)$$

$$P_2 = -\frac{R_n}{2L_n} - \sqrt{\left(\frac{R_n}{2L_n}\right)^2 - \frac{1}{L_n C}} \quad (9)$$

$$A_1 = \frac{P_2 U(t_{n-1}) - EP_2 - I(t_{n-1})/C}{P_2 - P_1} \quad (10)$$

$$A_2 = \frac{P_1 U(t_{n-1}) - EP_1 - I(t_{n-1})/C}{P_1 - P_2} \quad (11)$$

当电路满足欠阻尼条件 $R_n < 2\sqrt{L_n/C}$ 时, 为振荡充电过程, 电容器两端电压以及回路电流为:

$$U_C(t) = 2e^{-\delta(t-t_{n-1})} [k_1 \cos \omega(t-t_{n-1}) - k_2 \sin \omega(t-t_{n-1})] + E \quad (12)$$

$$I(t) = 2Ce^{-\delta(t-t_{n-1})} [(-\delta k_1 - k_2 \omega) \cos \omega(t-t_{n-1}) - (\delta k_2 - k_1 \omega) \sin \omega(t-t_{n-1})] \quad (13)$$

其中

$$\delta = \frac{R_n}{2L_n} \quad (14)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_n C} - \left(\frac{R_n}{2L_n}\right)^2} \quad (15)$$

$$k_1 = \frac{U(t_{n-1}) - E}{2} \quad (16)$$

$$k_2 = \frac{-I(t_{n-1})/C + \delta[-U(t_{n-1}) + E]}{2\omega} \quad (17)$$

脉冲电容器的电压和回路电流由数学模型求得, 根据 R_n 、 L_n 和 C 的关系可以确定电路系统工作在非振荡充电过程还是振荡充电过程, 求得的电容器两端电压以及回路电流又为电压控制和电流控制提供了基础。

2.2 电压控制方法

基于 BPCSs 的 HCC 充电电源充电控制系统中, 对于电压的控制主要是对电压充电维持精度的控制和电压停止精度的控制, 这里只针对电压停止精度的方法展开。要想实现电压停止精度的控制, 需要明确各个环节引起的电压误差, 然后结合采集到的电压, 再对真实的充电电压采用闭环控制, 从而达到精确控制效果。下面重点分析各个环节引起的电压误差。在电容器模组的输入端和地之间放置分压器(假设分压器精度为 x), 分压器测量的电信号经过光电转换后, 由数字电路分析判断是否达到目标充电电压, 输出电压达到目标电压则数字电路输出停止信号, 经开关驱动电路放大后, 控制级联模组中 IGBT 开关断开。其中, 分压器输出电信号到开关驱动电路输出驱动信号的响应时间为 Δt_1 , 开关响应时间为 Δt_2 , 开关断开后, 不考虑开关的延时, 由于回路电感的存在, 充电电流不会立刻减小到零, 只有电感中能量衰减到零后, 脉冲电容器上电压才不再增加。假设充电电压为 U , 充电电流为 I , 充电电压停止精度的影响因素和各因素引起的最大电压误差如图 5 所示。

在图 5 所示充电电压停止精度分析中, 可由相应算式计算各环节引起的电压误差, 结合处理器采集得到的充电电压, 加上上面计算的电压误差, 通过与设置电压进行比较来提前控制充电过程的停止, 从而达到充电电压停止精度的控制。

2.3 电流控制方法

电流控制的目的是实现其控制的稳定、准确和快速, 从而达到近似恒流的目的。为了满足要求, 采用最大电流一致性的控制方法, 即每级电池组串入

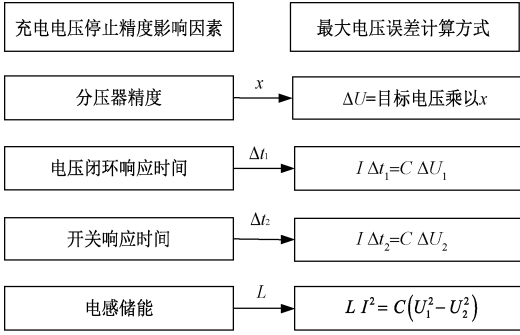


图 5 电压误差计算方式

Fig.5 Calculation method of voltage error

回路产生的最大电流都不能超过设定电流,因此需要找到到达最大电流的时间。通过对式(7)和式(13)中的 t 求导数,即可求得。所以过阻尼状态和欠阻尼状态下到达最大电流的时间分别为式(18)和式(19)。

$$t_m = \frac{\ln \frac{A_1 P_1^2}{-A_2 P_2^2}}{P_2 - P_1} + t_{n+1} \quad (18)$$

$$t_m = \frac{1}{\omega} \arctan \frac{(\delta^2 - \omega^2)k_1 + 2\delta\omega k_2}{(\delta^2 - \omega^2)k_2 - 2\delta\omega k_1} + t_{n+1} \quad (19)$$

具体的电流控制方法如图 6 所示,首先根据电路参数信息判断系统工作在过阻尼状态还是欠阻尼状态,选用对应数学模型,算法从 t 时刻开始,由式(7)或式(13)计算回路电流,由上面的式(18)或式(19)计算出现最大电流的时间 t_m ,然后假设在 t 时刻串联一级新电池组,计算此时刻由新电池组叠加所引起的最大电流,如果此最大电流的值超过设定值,则重复 t 时刻后的循环求解过程。如果最大电流恰好等于设定值,保存此时刻作为新一级电池组串入回路的时刻,并且开始新一轮的循环,直至所有电池组串入回路,循环结束。

当电流设定值等于由第一级电池组所产生的最大电流值时,此为时序重构法,其充电电流波形如图 7 所示,由图 7 可知为了保持最大电流的一致性,这个电流 I_0 始终被第一级电池组所产生的最大电流值所限制,其最大电流较小,平均电流也小,这样就会造成充电时间过长,不能满足快速充电的需求,换句话说电容器两端电压不能在较短时间内达到设定电压。所以电流控制方法需要改变来满足系统快速的充电需求,即采用时序重构前移算法,如图 8 所示,当由第一级电池组所产生的最大电流不满足要

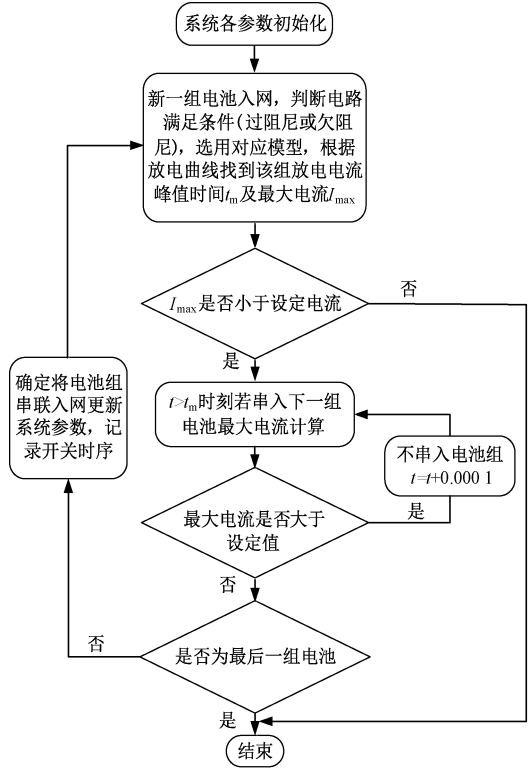


图 6 控制流程图

Fig.6 Control flow chart

求时,下一级的电池组可以提前串入回路进行电容器的充电,这样每级电池组串入回路的时间都被提前,直到回路电流到达最大电流设定值 I_1 ,可以看到每一级电池组级联所形成的电流变大了,并且稳定在 I_1 这一数值上,平均电流也得到增大,充电时间大大缩短。这一算法时间迭代的计算是从到达最大电流的时刻之后开始的,所以仍然有优化的空间,即从到达最大电流的时刻之前来循环计算,如图 9 所示,下一级的电池组可以更早地级联到电路中来使电流更快到达设定值,这一算法进一步增大了平均电流,缩短了充电时间,对基于 BPCSs 的 HCC 充电电源电流控制方法来说是非常必要的。考虑到其快速充电的特性,在电容器的大规模充放电领域具有重要的应用价值。

3 仿真实验

根据第 2 节中的数学模型以及电压电流控制方法,在仿真平台 PSIM 里面建立充电系统的仿真模型,并加入缩短充电时间的电流控制算法。针对图 7 的时序重构法仿真在文献 [11,12,15-18] 中已经分析,这里仅仿真作为对比。针对图 8 和图 9 的时序重构前移算法的仿真是本文重点要介绍的,仿真

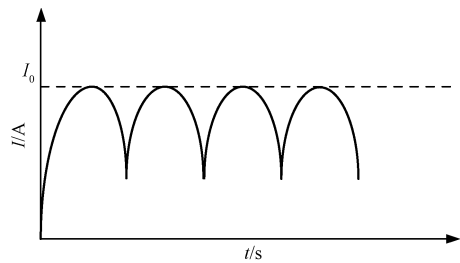


图 7 时序重构算法电流波形

Fig.7 Current waveform of time sequence reconstruction algorithm

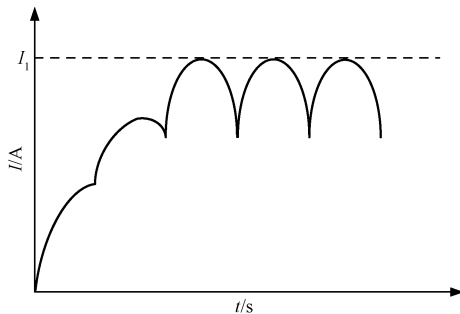


图 8 时序重构前移算法电流波形

Fig.8 Current waveform of forward time sequence reconstruction algorithm

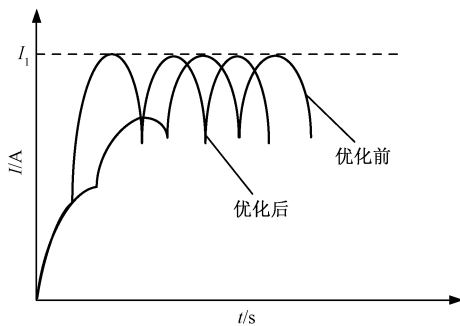


图 9 优化前后电流波形对比

Fig.9 Comparison of current waveforms before and after optimization

参数设定值如表 1 所示。时序重构算法下的电容器两端电压以及回路电流的仿真波形如图 10 所示。受算法限制,达到的最大电流受第一级电池组所产生的最大电流制约,充电电流小,充电时间长,在 22.3 s 内到达设定电压 6 000 V(平均电流为 80.2 A,平均功率为 0.022 MW)。时序重构前移算法下的电容器两端电压以及回路电流的仿真波形如图 11 所示。基于新的算法,最大电流设定值 I_1 为 670 A,达到的最大电流不再受第一级电池组所产生的最大电流的制约,最终第三级电池组级联后回路最

大电流达到 I_1 ,充电电流明显变大。电容器两端电压缓慢上升,并在 3.31 s 内到达设定电压 6 000 V(平均电流为 542 A,平均功率为 0.982 MW)。然而算法仍可以优化来使得充电速度更快,如图 12 所示,设定电流由第二级电池组级联后达到。优化算法使得电容器两端电压在 3.28 s 内到达设定值 6 000 V(平均电流为 548 A,平均功率为 1.002 MW)。

表 1 仿真模型参数表

Tab.1 Parameter table of simulation model	
参数	数值
电池组总级数	15
每级电池组电压/V	520
每级电池组等效内阻/mΩ	0.035
每级电池组等效电感/μH	30
IGBT 管压降/V	2.25
二极管管压降/V	2.1
回路电感/mH	35
回路电阻/Ω	1.3
回路电容/F	0.3
最大电流设定值/A	670

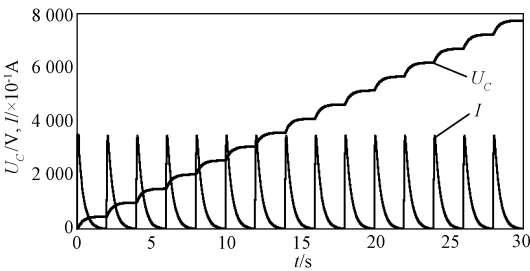


图 10 时序重构算法仿真电压电流波形

Fig.10 Voltage and current waveform of time sequence reconstruction for simulation algorithm

仿真结果还表明:时序重构前移算法以及其优化算法相对时序重构算法来说,每一级电池组的投入时刻都提前。在给脉冲电容器充电的过程中,为了保证电流更快地达到设定值,相对于时序重构前移算法,优化算法通过前移第二级电池组投入的时刻,从而提升了充电电流。在实际应用中,考虑到回路参数,若是第二级电池组投入时刻优化后仍不能达到设定电流,则需要第三级电池组,甚至第四级电池组尽快投入回路,从而使电流更快地达到设定值。当电流达到设定值后,为了保证剩下的各级电池组依次投入后的回路电流也能达到这一设定值,其投入时刻受前面几级电池组过早投入影响都需前移,但是每级投入时刻之间的间隔和时序重构前移

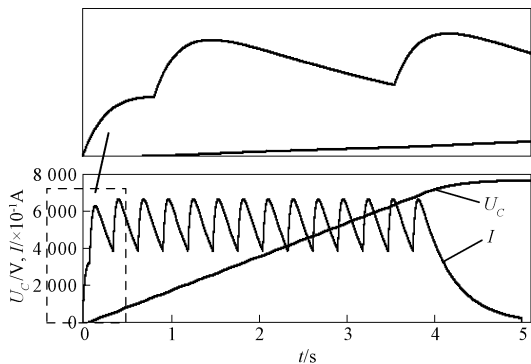


图 11 时序重构前移算法仿真电压电流波形

Fig.11 Voltage and current waveform of forward time sequence reconstruction algorithm for simulation

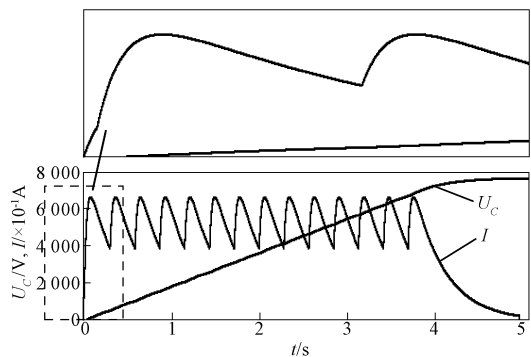


图 12 优化算法仿真电压电流波形

Fig.12 Voltage and current waveform of optimized algorithm for simulation

算法差别不大。总的来说时序重构前移算法和其优化算法都能增大平均电流,缩短充电时间,都具有平均功率高的优势。

4 实验验证

为了验证时序重构前移算法的有效性,进行了相关的验证实验。同时在算法中加入了电压控制,因为电流的增大会增加电压控制的难度。该算法采用数学模型计算了引起电压误差的因素,避免了电流增大引起的电压误差。时序重构前移算法和其优化算法的实验波形如图 13 和图 14 所示。实验结果表明,达到目标电压后,脉冲电容器的电压没有增加,且停止过程比较准确。由于平均电流的增加,两种算法都能以较快的充电速度达到设定电压。通过设定相同的目标电压(1 500 V)来比较充电速度。时序重构前移算法使得电容器在 0.915 s 达到 1 500 V,其平均电流为 494.286 A,平均功率为 0.810 MW。其优化算法使得电容器在 0.882 s 达到

1 500 V,其平均电流为 512.734 A,平均功率为 0.872 MW。时序重构前移算法及其优化算法的平均电流、平均功率都较大,充电时间都较短。实验所得回路最大电流 655 A,而仿真验证的回路最大电流达到了设定值 670 A,这是因为实验测试所用的电感器的电感值存在误差,而且有一定的内阻,这导致了时序重构前移算法及其优化算法的实验平均电流比仿真平均电流都小,其平均功率也都小。优化算法的平均电流、平均功率比优化前更大,充电时间比优化前更短。实验与仿真波形基本一致,验证了该算法的实用性。

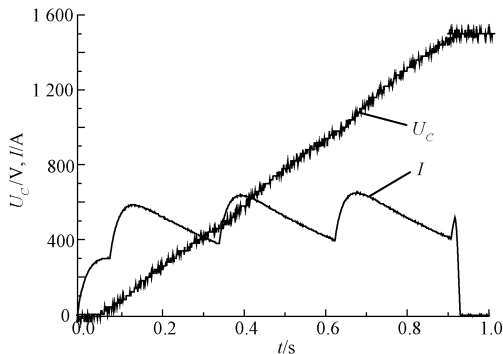


图 13 时序重构前移算法实验电压电流波形

Fig.13 Voltage and current waveform of algorithm of time sequence reconstruction and forward for experiment

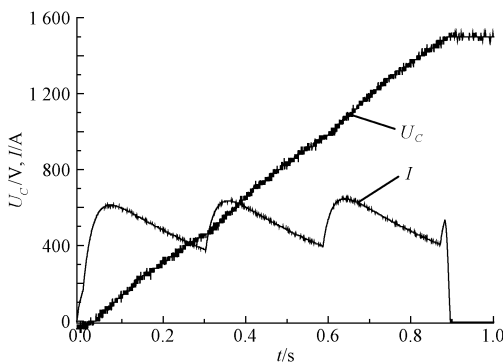


图 14 优化算法实验电压电流波形

Fig.14 Voltage and current waveform of experiment of optimized algorithm

5 结论

本文基于 BPCSs 的 HCC 充电电源不同于传统的 HCC 电源,具有充电功率大,功率密度高的优势。在充电系统的能量传递过程中,通过建立系统精确模型和时序重构前移算法及其优化算法的应用,在保证充电电流最高峰值及其稳定性基础上,进一步

提高了充电电流的平均值,从而缩短了脉冲电容器的充电时间。文中采用的时序重构前移算法及其优化算法都使充电电流在峰值一定的情况下获得较大的平均值。仿真结果和实验结果验证了该方法的可行性和有效性。

参考文献 (References):

- [1] Wencong S, Habiballah E, Wenten Z, et al. A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8 (1): 1-10.
- [2] 侯春, 朱旺, 水恒琪, 等 (Hou Chun, Zhu Wang, Shui Hengqi, et al.). 基于 LCL-LC / LCL 混合补偿的多电动汽车恒流恒压无线充电系统特性分析 (Characteristic analysis of constant current and voltage wireless charging system for multi-electric vehicles based on LCL-LC / LCL hybrid compensation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 58-68.
- [3] 樊爱龙, 孙鹞鸿, 徐旭哲, 等 (Fan Ailong, Sun Yao-hong, Xu Xuzhe, et al.). 单通道电火花震源及其放电实验研究 (Single channel electric spark source and discharge experimental study) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (5): 48-54.
- [4] 唐雄民, 余亚东, 李思琪, 等 (Tang Xiongmin, Yu Yandong, Li Siqi, et al.). 典型调节方式下串联谐振供电的 DBD 型臭氧发生器负载调节特性研究 (Research on load regulation characteristics of DBD type ozone generator under typical adjustment strategies) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (5): 54-58.
- [5] 杨玉岗, 许静, 赵若冰, 等 (Yang Yugang, Xu Jing, Zhao Ruobing, et al.). 基于通道控制下交错并联 Buck 变换器最佳换相点的研究 (Research for interleaved Buck converter of proportional phase-shedding current) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (7): 31-35.
- [6] 周仁, 鲁军勇, 龙鑫林, 等 (Zhou Ren, Lu Junyong, Long Xinlin, et al.). 混合储能蓄电池组放电均衡优化研究 (Discharging equalizer optimization study of power batteries for hybrid energy storage) [J]. 海军工程大学学报 (Journal of Naval University of Engineering), 2016, 28 (3): 105-109.
- [7] Oliver L, Stephan H, Paul F. Inductive pulsed power supply for a railgun artillery system [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47 (5): 2550-2555.
- [8] Michael J, Juergen B. Optimal design of a modular series parallel resonant converter for a solid state 2.88 MW/115 kV long pulse modulator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42 (10): 3014-3022.
- [9] Seung-Hee L, Seung-Ho S, Hyun-Bin J, et al. Solid-state bipolar pulsed-power modulator based on a half-bridge power cell structure [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47 (10): 4466-4472.
- [10] Dominik B, Stefan W, Juergen B, et al. 25 kW three-phase unity power factor Buck-Boost rectifier with wide input and output range for pulse load applications [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36 (5): 2747-2752.
- [11] 李超, 鲁军勇, 江汉红, 等 (Li Chao, Lu Junyong, Jiang Hanhong, et al.). 电磁发射用多级混合储能充电方式对比 (Comparison of charging methods of multilevel hybrid energy storage for electromagnetic launch) [J]. 强激光与粒子束 (High Power Laser and Particle Beams), 2015, 27 (7): 075005-1-075005-6.
- [12] Long X, Lu J, Zhou R, et al. Research on the influence of stray parameters in the circuit of the hybrid energy storage [A]. 2018 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation [C]. Changsha, China, 2018. 69-73.
- [13] Federico B, Gabriele F, Roberto R, et al. High-efficiency digitally controlled charge equalizer for series-connected cells based on switching converter and super-capacitor [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9 (2): 1139-1147.
- [14] Markus E, Wolfgang G, Thomas B, et al. A current equalization method for serially connected battery cells using a single power converter for each cell [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60 (12): 4227-4237.
- [15] 李超, 鲁军勇, 马伟明, 等 (Li Chao, Lu Junyong, Ma Weiming, et al.). 电磁发射用多级混合储能充电策略优化 (Charging strategy amelioration of multilevel hybrid energy storage for electromagnetic launch) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (13): 118-124.
- [16] Kun L, Yaohong S, Yinghui G, et al. High-voltage high-frequency charging power supply based on voltage feedback and phase-shift control [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41 (5): 1358-1363.
- [17] Kun L, Yinghui G, Rongyao F, et al. Design of control system for battery cascade charging power supply [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45 (7): 1245-1250.

[18] 李超, 鲁军勇, 江汉红, 等 (Li Chao, Lu Junyong, Jiang Hanhong, et al.). 混合储能中电容器电压精确控制策略研究 (Study of capacitor voltage precise-control strategy of multilevel hybrid energy storage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (7): 2231-2235.

Research on current control method of high-voltage and constant current charging power supply based on battery packs connected in series

TAN Qiang^{1, 2}, GAO Ying-hui^{1, 2}, LIU Kun^{1, 2}, HAN Jing^{1, 2},
SUN Yao-hong^{1, 2}, YAN Ping^{1, 2}

- (1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stability of current control and precision of voltage control are the key technologies of high-voltage and constant current (HCC) charging power supply control system. In this paper, a new current closed-loop control method is proposed, which is applied in the charging power source based on battery packs connected in series (BPCSs). In this method, the maximum charging current is improved by using an algorithm of forward time sequence reconstruction and the average value of the current is increased. Firstly, the theoretical model of HCC charging power supply based on BPCSs is established, by which the voltage control method and the current control method are obtained. Secondly, the simulation models are set up in PSIM. Simulation results validate the effectiveness of the method. Finally, a prototype experiment is designed based on the simulation results. The experimental results verify the feasibility of the method in engineering application. This method ensures that the charging current can not only reach the peak value, but also maintain its stability, thus increasing the average value of the current. The method is featured by shortening the charging time and improve the charging speed of HCC charging power supply.

Key words: battery packs; charging time; current control; voltage control; average current