

DOI: 10.7652/xjtuxb201502016

大功率混合储能装置控制策略研究

吴海峰, 鲁军勇, 马伟明, 关晓存, 张晓, 沈建清
(海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 430033, 武汉)

摘要: 针对电磁发射装置在连发时其储能电源对电网瞬时功率需求极大、一般电网难以承受的问题,提出了一种新的混合储能方式及其控制策略。该方式将蓄电池与脉冲电容器进行复合储能,采用多组蓄电池串联充电的新型拓扑结构,通过调整电路参数和时序触发控制策略,可以精确控制在不同时刻将多组蓄电池逐步接入电路对脉冲电容器充电,实现了对脉冲电容器的近似恒流充电,使脉冲电容器快速、高效地达到所要求的电压值。仿真与试验结果表明,该混合储能方式合理可行,在时序触发的控制策略下可实现在较短时间内将蓄电池能量传递给脉冲电容器,使功率逐级增大,从而降低网侧的瞬时功率需求。

关键词: 电磁发射;混合储能;蓄电池组;触发时序

中图分类号: TM359.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)02-0093-06

Control Strategy for High Power Hybrid Energy Storage Device

WU Haifeng, LU Junyong, MA Weiming, GUAN Xiaocun, ZHAN Xiao, SHEN Jianqing
(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The storage power supply of the electromagnetic launcher in continuous emission requires extreme transient power from power grid, which usually is unable to undertake. A novel hybrid energy storage scheme and the control strategy are proposed to lower the transient power, where multiple batteries connected in series are used for the hybrid energy storage of batteries and pulse capacitors. The batteries are switched into the circuit gradually for charging the pulse capacitors with approximately constant current by timing triggering control strategy to adjust circuit parameters, thus the pulse capacitors reach the required voltage quickly and efficiently. The simulated and experimental results show that the scheme of hybrid energy storage is reasonable and feasible. The timing triggering control strategy can meet the requirement of delivering energy from the batteries to the pulse capacitors in a short period, and the power is gradually heightened to lower the extreme transient power from the power grid.

Keywords: electromagnetic launch; hybrid energy storage; batteries; trigger timing

随着脉冲功率技术的不断发展,作为能量源泉的脉冲电源技术日趋受到人们重视^[1]。常用的脉冲功率电源直接利用电网给脉冲储能装置供电,储能装置再将能量瞬时转换到脉冲成型网络中以供负载使用^[2]。

电磁发射装置采用脉冲功率电源提供能量,随着发射所需的能量越来越大,发射间隔越来越短,对电网的瞬时功率需求要求越来越高,目前常规的电力系统很难满足要求^[3]。

海军工程大学提出了脉冲功率电源应采用混合

储能的形式,其核心思想是将电网的能量在相对较长时间内传递给初级能源储存起来,以减小充电功率;当需要进行快速发射时,初级能源在短时内再给脉冲储能装置充电,实现了充电功率的增大。可见,在能量不变的前提下,电网与脉冲储能间增加的初级能源起到了功率放大作用,从而减小了对电网的瞬时功率需求。

脉冲电容器是目前使用最为广泛的脉冲储能器件,按充电方式脉冲电容器充电可分为恒压充电和恒流充电。恒压充电的效率低(低于50%),不适用于大功率的场合。恒流充电过程中电流基本不变,电容器电压呈线性上升,充电速度快,效率高,非常适用于给高压脉冲电容器充电^[4]。

脉冲电容器的能量存储主要靠高压直流充电电源来实现^[5]。文献[6]介绍了直流恒压充电、线性升压实现恒流充电和逐级台阶升压实现近似恒流充电3种直流充电方式,得出了逐级台阶升压实现近似恒流充电的规律,且充电效率高。

本文根据脉冲功率电源的要求,提出了蓄电池组与脉冲电容器复合的储能方式和新型的拓扑结构;通过优化大功率蓄电池组的时序触发策略,实现了蓄电池组逐级台阶升压对脉冲电容器充电,极大降低了电网的功率需求。

1 混合储能装置总体方案

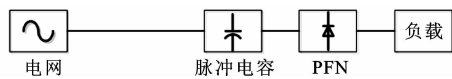
1.1 初级能源的选择

目前,常见的脉冲功率电源的系统组成见图1a,由图中可见脉冲电容对电网的瞬时功率需求非常大。以文献[7]中的技术指标为例,脉冲储能电源为电磁发射提供能量,当炮口动能为32 MJ、电磁发射转化效率为30%时,为达到12发/min的连发目的,即5 s充电,则瞬时功率需求为42.6 MW,一般的平台难以提供如此大的功率。

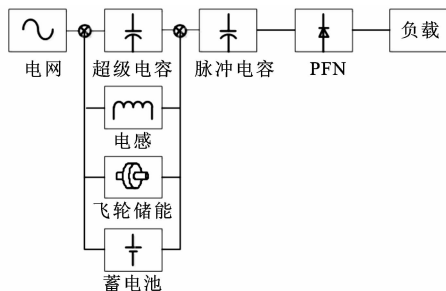
图1b在电网与脉冲电容间增加了可选择的几种初级能源作为缓冲,先在初级能源中存储足够的能量,若要求1 h内存储100发的能量,对电网的瞬时功率需求就为5.92 MW,相比于图1a的模式降低了7.19倍。可见,将初级能源与脉冲电容器进行混合储能,可大大降低对电网瞬时功率的需求。

脉冲功率电源的初级能源形式有很多,针对不同能量和功率的脉冲电容器,对初级能源的要求也不一样。超级电容器功率密度高,但储能密度很低,存储足够的能量需要很大的体积,很难满足小型化的要求^[8]。电感储能方式对断路开关的要求特别苛

刻,且目前超导技术成本很高^[9]。利用惯性储能,难以瞬间将全部能量取出,无法实现高功率密度要求^[10]。相对来说,蓄电池储能密度很高,功率密度也较高,能满足目前大部分电磁发射装置的功率需求。本文选择将蓄电池组与脉冲电容器进行混合储能。



(a) 常见脉冲功率电源



(b) 混合储能形式的脉冲功率电源

图1 脉冲功率电源的组成

1.2 蓄电池放电总体方案

系统采用逐级台阶升压的方式,将多组蓄电池串联起来,通过在不同时刻控制开关逐步将蓄电池组接入到电路中,蓄电池组逐级升压给电容器充电。电路中串入电感起限流的作用,系统拓扑结构图如图2所示。

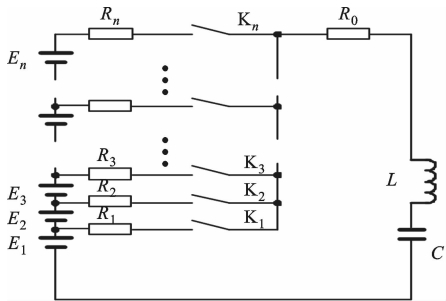


图2 系统拓扑结构图

在不同时刻触发开关可以使电流实现近似恒定。首先闭合第一组蓄电池的开关,将第一组蓄电池接入电路,当脉冲电容器的电压增加到第一组蓄电池的输出电压时,充电电流降低,此时另一组蓄电池再切换进电路,依此类推。

本文方案设计蓄电池组为串联,若每次依照从下至上或者从上至下的顺序放电,则工作于最下方或最上方的电池组放电时间最长,长期运行后,电池组会产生明显的不一致性。为解决这一问题,本文方案依照电池电压从高到低的顺序放电,电压最高的先放电,电压最低的最后放电,如此多个工作周期

后,蓄电池仍可以保持较高的一致性。

2 混合储能装置控制策略

蓄电池组采用时序放电的控制策略,按照时序逐步将各组蓄电池接入电路,以实现脉冲电容器的充电电流为近似恒定,因此决定蓄电池触发的时刻十分关键。第 n 组蓄电池的触发时刻可以在给定电路参数下由基本电路理论得出,由充电电流 $I(t)$ 、脉冲电容电压 $V_C(t)$ 和串联的 n 个蓄电池组的输出电压决定。

由于放电时间短,因此可以假设在放电过程中蓄电池的电压恒定,且每组蓄电池电压一致,由电路回路电压之和为零可知

$$R_n I(t) + L \frac{dI}{dt} + V_C(t_n) + \frac{1}{C} \int_{t_n}^t I(t) dt - nV_E = 0 \quad (1)$$

式中: $V_C(t_n)$ 为在 t_n 时刻第 n 个蓄电池组刚切换到电路中时脉冲电容的电压; V_E 为每个蓄电池组的电压; R_n 为电路中的总电阻。整理式(1)并对 $I(t)$ 求导,得到常系数齐次线性微分方程

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_n}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \frac{I(t)}{L} = 0 \quad (2)$$

若电阻值满足

$$R_n < 2(L/C)^{1/2} \quad (3)$$

则电路是欠阻尼的,那么 $I(t)$ 的解为

$$I(t) = [I_1 \sin \omega_n(t - t_n) + I_2 \cos \omega_n(t - t_n)] \exp\left(-\frac{t - t_n}{\tau_n}\right) \quad (4)$$

其中衰减时间常数

$$\tau_n = \frac{2L}{R_n} \quad (5)$$

共振频率

$$\omega_n = \frac{1}{L} \left(\frac{L}{C} - \frac{R_n^2}{4} \right)^{1/2} \quad (6)$$

对式(4)求导,当 $dI/dt = 0$ 时, $I(t)$ 取得最大值 I_m ,即第 n 个蓄电池组触发后电路能达到的最大充电电流。此时,取得最大值时间为

$$t_m = \frac{1}{\omega_n} \arctan \left[\frac{2\omega_n \tau_n}{2\Delta V(t) - R_n(1 - \omega_n^2 \tau_n^2)I(t_n)} \right] + t_n \quad (7)$$

将 t_m 代入式(4)即可得到 I_m 的值。其中蓄电池组输出电压和脉冲电容器电压之差为

$$\Delta V(t) = nV_E - V_C(t_n) \quad (8)$$

如果不能满足式(3),则电路是过阻尼的,此时

$$I(t) = I_1 \exp\left(-\frac{t - t_n}{\tau_{1n}}\right) + I_2 \exp\left(-\frac{t - t_n}{\tau_{2n}}\right) \quad (9)$$

同理,整理计算可以得到在下一个蓄电池组触发后电路输出的最大电流的时间 t_m ,代入式(4)即可得到 I_m 的值。

设脉冲电容器所要求的峰值电流为 I_M ,当监测到的 $I(t)$ 和 $V(t)$ 使 $I_m < I_M$ 时,下一个蓄电池组被触发来维持输出电流,但是峰值电流 I_m 不能超过 I_M 。因此,当 $I(t)$ 和 $V(t)$ 使 $I_m \leq I_M$ 时,即为下一个蓄电池组触发的时刻。

3 仿真结果及分析

利用仿真软件 Ansoft Simpleror 建立仿真模型,仿真电路图参照图 1 所示。其中,取 $n=5$, $R_0=50 \text{ m}\Omega$, $R_1=R_2=\dots=R_5=500 \text{ m}\Omega$, $L=5 \text{ mH}$, $C=2.3 \text{ mF}$ 。每个蓄电池组由 10 个 12 V 的蓄电池组成,5 组蓄电池组串联给电容充电。根据以上电路参数进行计算,得到各蓄电池组的控制时序,如表 1 所示。

表 1 各蓄电池组的控制时序

模块	1	2	3	4	5
t_n/ms	0.0	6.7	10.4	14.1	17.8

按照该时序逐步将 5 个蓄电池组接入电路,则可以分别得到充电电流和电容器电压的波形如图 3 和图 4 所示。

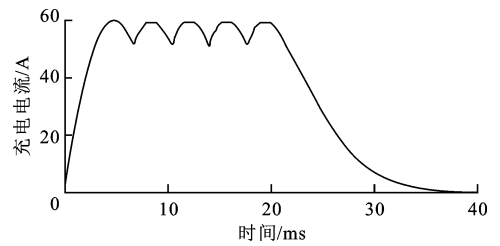


图 3 电容器的充电电流波形

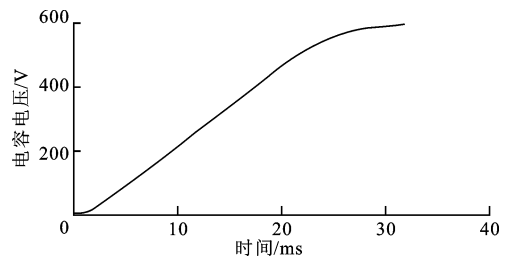


图 4 电容器两端的电压波形

从仿真波形可以看出,充电电流基本不变,且峰

值相等,电容器两端的电压随时间基本呈线性上升,这说明了该控制策略满足了近似恒流充电的要求。

若蓄电池的电动势和各电阻不变,取 $L=8\text{ mH}$, $C=3\text{ mF}$,则得到的控制时序如表 2 所示。

表 2 改变参数得到的控制时序					
模块	1	2	3	4	5
t_n/ms	0.0	9.7	15.0	20.3	25.5

在表 2 时序下进行仿真,得到的电流、电压的波形如图 5 和图 6 所示。

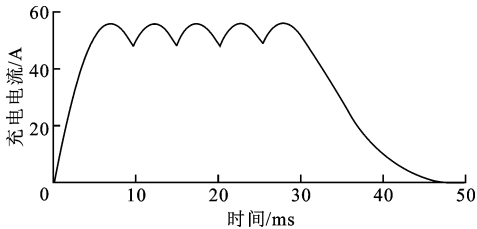


图 5 $L=8\text{ mH}$ 、 $C=3\text{ mF}$ 的充电电流波形

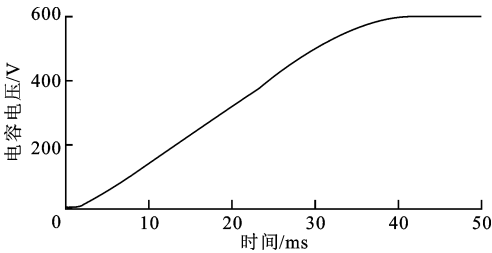


图 6 $L=8\text{ mH}$ 、 $C=3\text{ mF}$ 的电容器电压波形

电路参数改变后,根据计算得到开通时序,就可以得到相应的波形。但是,充电电流峰值和波形宽度都发生了变化,达到所需充电电压所需的充电时间也不一样。可见,一旦电路参数确定了,开通时序可以唯一确定。不同电路参数可以确定不同的开通时序,不同的开通时序下得到电流和电压波形不同。

此外,在充电电路中电感值和电容值是非常关键的参数,它决定了电路中的峰值电流和充电时间。其他电路参数不变,取电感 $L=5\text{ mH}$,电容值分别为 2.3 mF 和 4.6 mF ,利用 Ansoft 软件仿真,得到对比结果如图 7 和图 8 所示。其中,电容为 2.3 mF 时峰值电流为 60 A ,在 35 ms 左右完成充电;电容为 4.6 mF 时峰值电流约为 80 A ,在 70 ms 时完成充电。从不同电容的仿真结果可以看出,电容越大,峰值电流和波形宽度越大,充电时间也越长。

图 9 和图 10 给出了其他电路参数不变,电容值 $C=4.6\text{ mF}$ 、电感值分别为 5 mH 和 10 mH 时,充电电流和电容电压的仿真波形。其中,电感为 5 mH

时峰值电流达到 80 A ,在 60 ms 左右完成充电;电感为 10 mH 时峰值电流为 60 A ,在 80 ms 时完成充电。

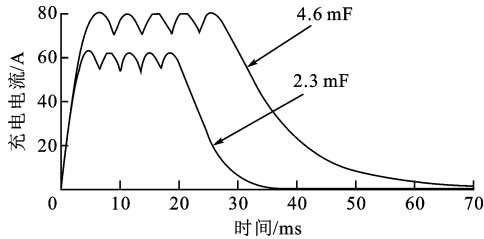


图 7 不同电容下的充电电流波形

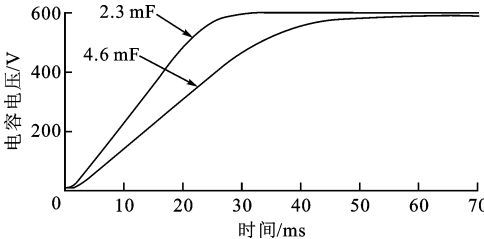


图 8 不同电容下的电容电压波形

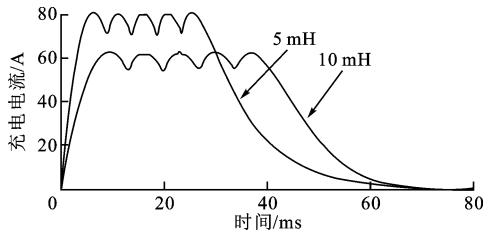


图 9 不同电感下的充电电流波形

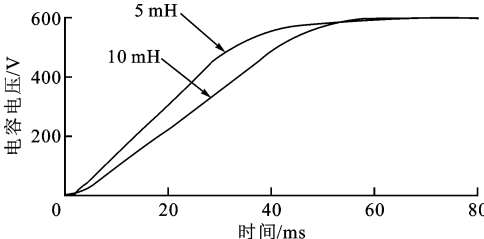


图 10 不同电感下的电容电压波形

从不同电感的仿真结果可以看出:①电感加大时,峰值电流变小,波形宽度增加;②电感减小后,峰值电流增加,脉宽变窄,充电时间变短。理论上电感没有最小值限制,实际应用中主要考虑器件的通流能力和蓄电池的放电电流。

4 试验结果及分析

根据混合储能的系统方案,利用实验室搭建的混合储能样机进行试验。将 10 个额定电压为 12 V 的蓄电池串联起来作为一组,共 5 组。电感器为 5 mH ,脉冲电容器由 36 个 $64\text{ }\mu\text{F}$ 的小电容并联组

成,值为 2.3 mF,总储能为 414 J。蓄电池可连续放电 100 次,且在 36 s 内将蓄电池能量补充完成。混合储能样机如图 11 所示。



(a) 蓄电池组



(b) 脉冲电容器

图 11 混合储能样机

利用软件编程,各组开关器件按表 1 的开通时序导通。由于软件的控制精度为 1 ms,对表 1 中的控制时序进行 4 舍 5 入处理,因此试验时的控制时序如表 3 所示。

表 3 试验时的控制时序

模块	1	2	3	4	5
t_n/ms	0	7	10	14	18

在试验过程中,用电流探头及高压差分探头分别测量主回路的充电电流和脉冲电容器两端的电压,接入示波器观测它们的波形。将试验波形与仿真波形(图 3、图 4)进行对比,如图 12、图 13 所示。

由图 12 对比可以发现,试验结果与理论分析及仿真结果基本一致,充电电流峰值为 60 A,虽然每个波峰的电流值不完全相等,但相差不大,基本实现了近似恒流充电。

试验波形的电流在第 2 个和第 5 个峰值时低于仿真电流,出现这种情形的原因在于软件的控制精度问题,导致蓄电池组的触发时序与仿真的时序不一致。如图 14 所示,如果太早触发蓄电池组,峰值电流将越过所要求的电流峰值 I_M 。相反地,如果太迟触发蓄电池组,电流将达不到所需的值,导致电流纹波过大,影响控制精度和脉冲电容器使用寿命。

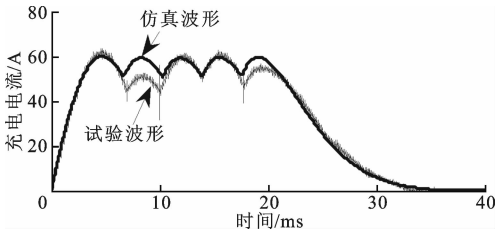


图 12 仿真与试验的充电电流波形对比

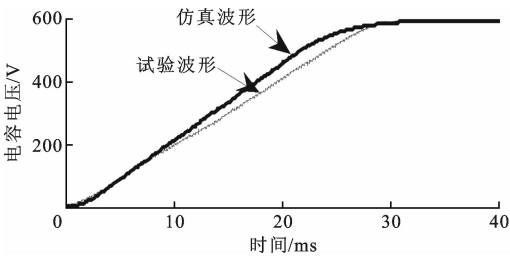


图 13 仿真与试验的电容电压波形对比

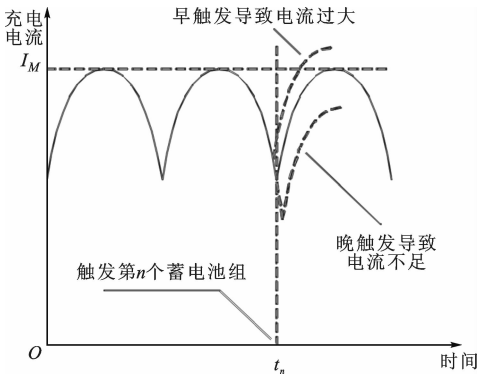


图 14 触发时间与充电电流的关系

通过对比表 1 和表 3 可见,第 2 组蓄电池的触发时间由原来的 6.7 ms 变为 7 ms,第 5 组的由 17.8 ms 变为 18 ms,触发时刻延迟于仿真值,导致充电电流低于仿真电流值。下一步可以通过提高软件的控制精度来改善这一问题。

图 13 中仿真波形和试验波形基本吻合,达到所要求电压的试验结果比仿真结果稍迟,也是因为触发时序不准导致的充电电流的差异。电容电压随时间线性上升,充电速度快,效率高,验证了系统的可行性。

为满足发射速度的需求,要求在 40 ms 内将脉冲电容器充满,当脉冲电容器直接挂电网时,其瞬时峰值功率需求为

$$P_1 = \frac{W}{0.5t_1} = 20\,700\text{ W}$$

(10)

式中: W 为每一发给脉冲电容器充电的能量; t_1 为单发的充电时间。

采用混合储能方式,本方案可以满足射速要求,

且电网瞬时峰值功率需求为

$$P_2 = \frac{100W}{0.5t_2} = 2\ 300\ W \quad (11)$$

式中: t_2 为蓄电池存储 100 发能量的总充电时间。

综上所述,本样机采用混合储能方式后对电网的瞬时功率需求仅为脉冲电容直接挂网的 1/9,极大地降低了电网的瞬时功率需求。

5 结 论

(1)在电网与脉冲电容间通过蓄电池储能作为缓冲,先将能量存储在蓄电池中,蓄电池在较短时间内再把能量传递给脉冲电容,依靠能量的二次转移从而实现功率的放大。

(2)提出了采用多组蓄电池串联充电的新型拓扑结构,通过时序触发的控制策略逐级将蓄电池接入电路,精确控制各组蓄电池的触发时间,实现给脉冲电容器近似恒流充电,并降低电流纹波系数,从而提高脉冲电容器的寿命。

(3)建立了系统仿真模型,研究了在该放电控制策略下,不同的电路参数对脉冲电容器充电性能的影响,结果表明:电容越小,峰值电流和波形宽度越小,则充电时间越短;限流电感越小,峰值电流越大,脉宽变窄,则充电时间也越短。

(4)研制了 5 组蓄电池和 2.3 mF 脉冲电容器的混合储能样机,试验表明,在近似 60 A 的恒流下,通过预设的时序逐级串入蓄电池组,可在 30 ms 内将脉冲电容器电压充至 600 V,试验结果与仿真基本吻合,验证了该方法的有效性。

(5)在发射速度的要求下,脉冲电容器直接挂网所需瞬时峰值功率达 20 700 W,而采用混合储能方式后,其充电功率为 2 300 W,仅为原来的 1/9,降低了储能装置对电网的瞬时功率需求。

参考文献:

- [1] 王晓明, 邹勇, 孙兆冲, 等. 一种电容式调压脉冲功率电源设计和工作分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 25-29.
WANG Xiaoming, ZOU Yong, SUN Zhaochong, et al. Design and operation analysis of a capacitive adjustable voltage pulsed power supply [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 25-29.
- [2] 刘福才, 金书辉, 赵晓娟. LC 串联谐振和 LCC 串并联谐振在高压脉冲电容充电电源中的应用比较 [J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3347-3356.
LIU Fucui, JIN Shuhui, ZHAO Xiaojuan. Comparison

of LC series resonant and LCC series-parallel resonant in high-voltage pulse capacitor charging power supply application [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3347-3356.

- [3] 王晓明, 赵宪宁. 一种 LCC 逆变充电混合储能脉冲功率电源 [J]. 高压电器, 2009, 45(5): 48-53.
WANG Xiaoming, ZHAO Xianning. LCC converter charging pulsed power supply with hybrid energy storage [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 33(6): 25-29.
- [4] 张东辉, 严萍. 20 kJ/s 电容充电电源的分析与设计 [J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 529-532.
ZHANG Donghui, YAN Ping. Analysis and design of 20 kJ/s capacitor charging power supply [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 529-532.
- [5] 刘福才, 金书辉, 赵晓娟. 串并联谐振高压脉冲电容充电电源的闭环控制 [J]. 电力电子技术, 2012, 46(6): 69-72.
LIU Fucui, JIN Shuhui, ZHAO Xiaojuan. Closed-loop control of high voltage pulse capacitor charging power supply based on series-parallel resonant [J]. Power Electronics, 2012, 46(6): 69-72.
- [6] 王俞卫. 蓄电池供电的脉冲功率电源系统研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [7] 古刚, 向阳, 张建军. 国际电磁发射技术研究现状 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29(1): 156-158.
GU Gang, XIANG Yang, ZHANG Jiange. The overview of the international electromagnetic launch technology research [J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(1): 156-158.
- [8] 张国驹, 陈瑶, 唐西胜, 等. 基于波动特征参数的多类型储能协调控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 271-276.
ZHANG Guojun, CHEN Yao, TANG Xisheng, et al. Research on coordinated control strategy of multi-type energy storage based fluctuation characteristic parameters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 271-276.
- [9] RIBEIRO P F, JOHNSON B K, CROW M L. Energy storage systems for advanced power applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(12): 1745-1746.
- [10] 戴兴建, 于涵, 李奕良. 飞轮储能系统充放电效率实验研究 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 20-24.
DAI Xingjian, YU Han, LI Yiliang. Efficient test on the charging and discharging of the flywheel energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 20-24.

(编辑 杜秀杰)