

半桥变换器与次序耦合变压器的超级电容均压电源

李洪珠, 张垒, 孙佳月

辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁葫芦岛 125105

中图分类号: TM4 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517 (2016) 12-6-125

摘要: 针对于超级电容串联储能系统中单体电压不均衡的问题, 本文介绍了一种基于半桥变换器和首尾次序耦合变压器的均压电路。利用次序耦合绕组可以减小因变压器单元漏感误差而引起的超级电容单体电压不均衡。该电路结构简单, 还可以均衡超级电容器的电压, 恒定开关频率和占空比, 不需要反馈控制环节。通过分析半桥变换器每个工作模态, 建立了输出电压方程, 推导了串联超级电容电压均衡方程。根据电路特性, 分析了变压器匝比设计方程及实现软开关变压器原边漏感要求。仿真及实验结果表明此均压电路具有均压速度快且均压效果好的特点。

关键词: 半桥变换器, 次序耦合, 超级电容器, 电压均衡

Voltage Balancing for Supercapacitor Based on a Half-bridge Inverter and Sequence Coupling Transformer

LI HONGZHU, ZHANG LEI, SUN JIAYUE

Liaoning Technical University electrical control engineering institute, HuLudao 125105, Liaoning Province, China

Abstract: According to the problem that cell voltage imbalance of series connected super capacitor in energy storage system, this paper presented a voltage-balance circuit for super capacitors in a half-bridge inverter based on the sequence coupling array integrated magnetic method. Sequence coupling method was used in secondary winding of converter to achieve voltage balance of monomer, which can reduced voltage unbalance caused by leakage error in transformer. The circuit topology is simple, and can automatically balance super capacitor voltage, feedback control can be eliminated when the system is operated with a fixed switching frequency and duty ratio. By analyzing the each working mode of half-bridge converter, established the output voltage equations, and the super capacitor voltage balance equation. According to the circuit characteristics, analyzes the design equation of the transformer turns ratio, and the leakage inductance of the transformer primary to achieve soft switch. The simulation and experimental results show that this equalizing circuit has both speed and pressure equalizing good features.

Keywords: half-bridge inverter, Sequence coupling transformer, super capacitor, voltage equalization

1 引言

微网由分布式电源, 分布式储能和能量管理模块构成负荷的供电系统, 与负荷一起组成一个独立的可控系统, 解决了大电网与分布式电源之间的矛盾。储能系统是调节微电源性能, 保证负荷供电质量, 抑制系统振荡的重要环节, 因此储能技术在微网中具有十分重要的作用。超级电容器^[1-3]

作为一种新型的储能器件, 具有法拉级甚至数千法拉的容量, 作为介于传统静态电容和电池之间的新型储能元件, 超级电容器具有功率密度高, 充放电速度快, 使用温度宽, 循环寿命长的优点, 因此被广泛用于微网储能系统中。但超级电容器单体电压较低, 必须将多个超级电容器串联起来满足电压的需求。由于超级电容容量偏差、漏电流以及等效串联电阻

的不同,都会使超级电容在充电时出现过充电现象,影响电容器使用寿命,因此超级电容在串联应用时必须考虑均压问题。

目前超级电容器的均压方法主要有能耗型和回馈型两种^[4],能耗型包括并联稳压二极管法和开关电阻法^[5],这种均压方法的优点是电路简单、成本低,缺点是二极管和电阻消耗能量,损耗严重。回馈型包括DC-DC变换器法^[6]和开关电容法^[7],该均压方法的优点是能量消耗低、均压速度快,缺点是电路结构复杂,系统控制困难。

本文介绍了一种基于半桥变换器和首尾次序耦合变压器的均压电路,利用变压器单元副边绕组首尾相接实现超级电容能量转移。此均压电路明显地减少了电路的复杂性,且均压过程不需要反馈控制环节。通过仿真分析和实验,验证了该新型电压均衡电路的可行性和有效性。

2 均压电路模型及其原理分析

2.1 电路拓扑结构

图1为所采用的超级电容器电压均衡电路原理图,为便于分析,本文给出4个超级电容器串联的情况。分压电容 C_1 、 C_2 与开关 S_1 、 S_2 组成半桥DC/AC变换器; T_1 ~ T_2 为2个变比相同的变压器, L_p 为变压器漏感,如图2所示,每个变压器由3个绕组构成,绕组 N_a 为原边绕组, N_b 、 N_c 为副边绕组, T_1 的原边绕组 N_{1-a} 和 T_2 的原边绕组 N_{2-a} 并联, T_1 的副边绕组 N_{1-c} 与 T_2 的副边绕组 N_{2-b} 串联, T_2 的副边绕组 N_{2-c} 与 T_1 的副边绕组 N_{1-b} 串联,实现变压器副边绕组首尾次序耦合; D_1 ~ D_4 为二极管, SC_1 ~ SC_4 为串联的超级电容器;

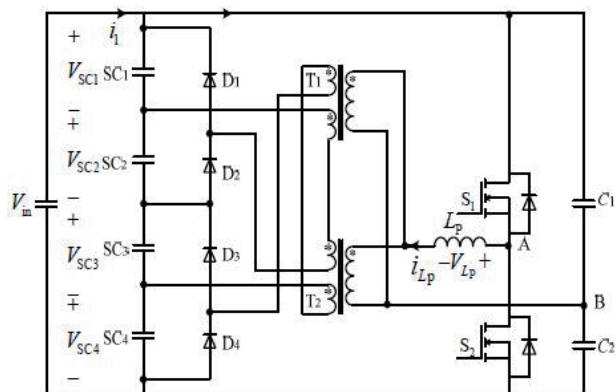


图1 超级电容器电压均衡模型

Fig.1 The voltage balancing model of supercapacitor

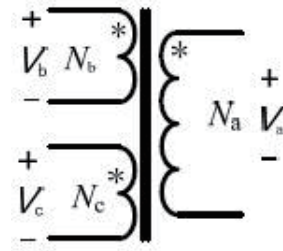


图2 隔离变压器单元

Fig.2 Isolation transformer unit

2.2 工作原理分析

半桥变换器的开关 S_1 和 S_2 以接近50%的占空比互补导通,超级电容器的端电压分别为 V_{SC1} 、 V_{SC2} 、 V_{SC3} 、 V_{SC4} ,二极管压降为 V_d ,由图2可得变压器原边绕组电压为:

$$V_{1-a} = V_{2-a} \quad (1)$$

变压器副边绕组的端电压为:

$$\begin{cases} V_{i-b} = \frac{n_b}{n_a} V_{i-a} \\ V_{i-c} = \frac{n_c}{n_a} V_{i-a} \end{cases} \quad (i=1,2) \quad (2)$$

在一个开关周期 T_s 内,超级电容器均压过程可以分为四个模式,其工作波形如图3所示。

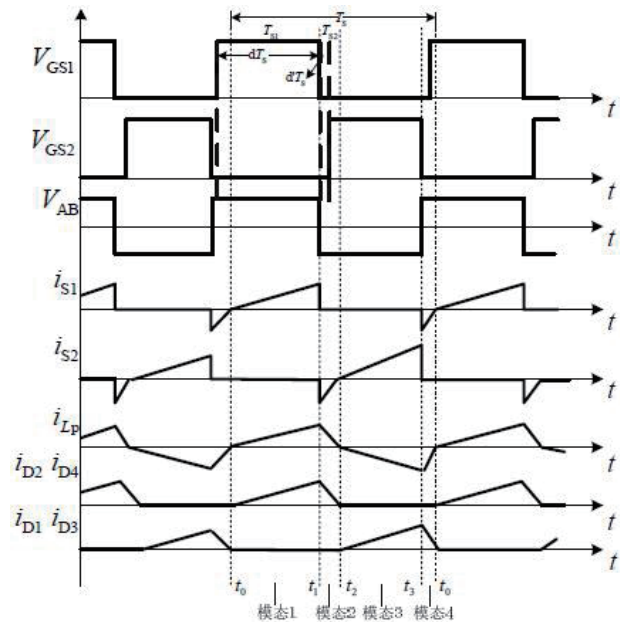


图3 工作波形

Fig.3 The working waveforms

模式1 (t_0 - t_1) (图4a): 开关 S_1 导通,变压器漏感 L_p 中的电流 i_{Lp} 上升,分为两种:

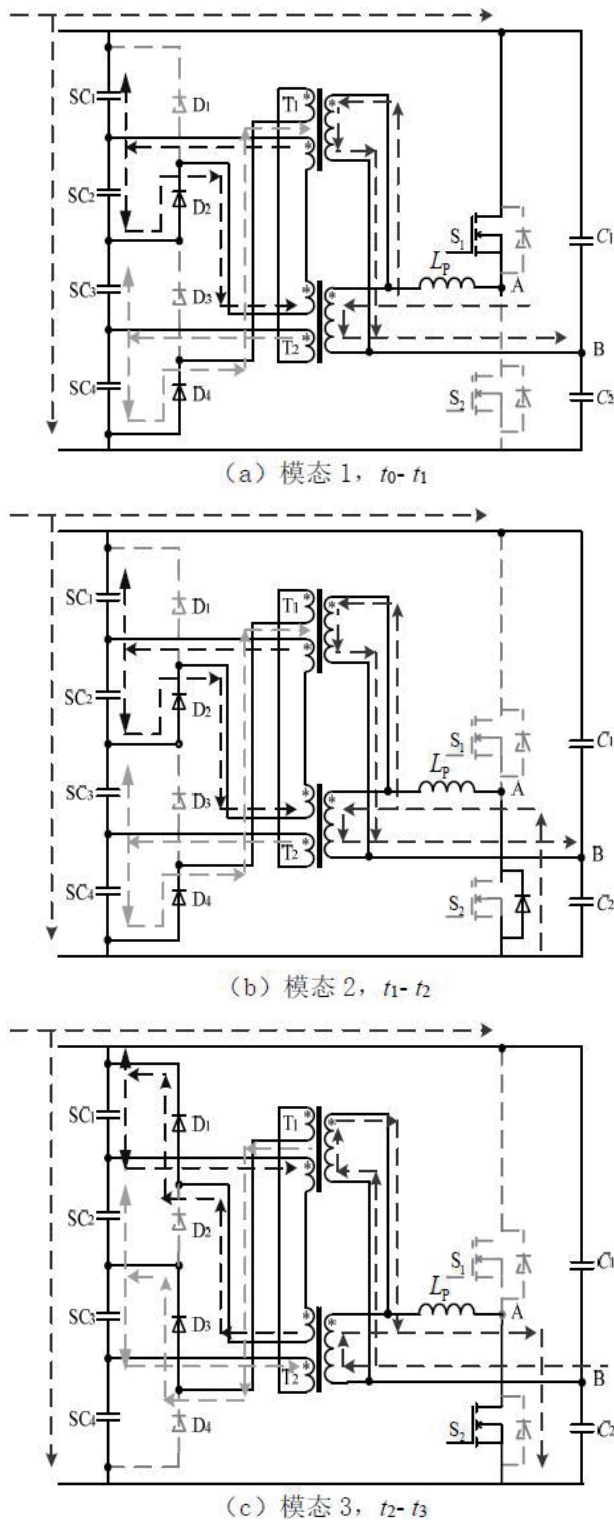


图4 均压等效电路

Fig.4 Equivalent circuits of voltage balance

(1) 当超级电容器单体电压小于变压器副边电压时, 二极管 D_2 和 D_4 导通, 流过二极管 D_2 和 D_4 的电流 i_{D2} 和

i_{D4} 上升, 此时

$$\begin{cases} V_{SC2} = V_{1-c} + V_{2-b} - V_d \\ V_{SC4} = V_{2-c} + V_{1-b} - V_d \end{cases} \quad (3)$$

(2) 当超级电容器的单体电压大于变压器副边电压时, 超级电容器所对应的二极管不导通, 超级电容器将能量回馈给电源。

模态 2 (t_1-t_2) (图 4b): 开关 S_1 关断, 变压器漏感 L_p 中的电流 i_{Lp} 经过开关 S_2 中的反并联二极管续流, S_2 ZVS 导通, 且二极管 D_2 和 D_4 持续导通, 电流 i_{Lp} 下降, 流过二极管 D_2 和 D_4 的电流 i_{D2}, i_{D4} 下降。

模态 3 (t_2-t_3) (图 4c): 在 t_3 时刻, 变压器漏感 L_p 中的电流 i_{Lp} 下降到 0, 电流 i_{Lp} 开始反向上升, 也分为两种情况:

(1) 当超级电容器单体电压小于变压器副边电压时, 二极管 D_1 和 D_3 导通, 流过二极管 D_1 和 D_3 的电流 i_{D1}, i_{D3} 增长, 此时

$$\begin{cases} V_{SC1} = V_{1-c} + V_{2-b} - V_d \\ V_{SC3} = V_{2-c} + V_{1-b} - V_d \end{cases} \quad (4)$$

(2) 当超级电容器的单体电压大于变压器二次侧电压时, 同模态 1 (2) 的情况。

模态 4 (t_3-t_0) (图 4d): 开关 S_2 关断, 变压器漏感 L_p 中的电流 i_{Lp} 经过开关 S_1 中的反并联二极管续流, S_1 ZVS 导通, 且二极管 D_1 和 D_3 持续导通, 变压器漏感 L_p 中的电流 i_{Lp} 反向下下降, 流过二极管 D_1 和 D_3 的电流 i_{D1} 和 i_{D3} 下降。当电流 i_{Lp} 下降到 0 时, 开始下一个周期。由式 (2)~(4) 得

$$\begin{cases} V_{SC1} = \frac{n_c}{n_a} V_{1-a} + \frac{n_b}{n_a} V_{2-a} - V_d \\ V_{SC2} = \frac{n_c}{n_a} V_{1-a} + \frac{n_b}{n_a} V_{2-a} - V_d \\ V_{SC3} = \frac{n_c}{n_a} V_{2-c} + \frac{n_b}{n_a} V_{1-a} - V_d \\ V_{SC4} = \frac{n_c}{n_a} V_{2-c} + \frac{n_b}{n_a} V_{1-a} - V_d \end{cases} \quad (5)$$

设变压器的匝比为 $n_a:n_b:n_c$, 其中 $n_b=n_c=n_s$, 由 (1) 和 (5) 可得, 各超级电容端电压表达式如 (6):

$$V_{SC1} = V_{SC2} = V_{SC3} = V_{SC4} = \frac{2n_s}{n_a} V_a - V_d \quad (6)$$

2.3 参数的设计

半桥变换器在前后两个半周期内的工作原理相同, 这

里只对 t_0-t_2 阶段进行分析。假设半桥变换器无损耗, 在模态 1 和模态 2 中, 变压器漏感 L_p 上的电压分别为 V_{Lp1} 和 V_{Lp2} , 则:

$$\begin{cases} V_{Lp1} = \frac{V_m}{2} - V_a \\ V_{Lp2} = -\frac{V_m}{2} - V_a \end{cases} \quad (7)$$

稳定情况下, 根据伏秒特性原理, 有 (8) 式成立

$$T_{S1}V_{Lp1} + T_{S2}V_{Lp2} = 0 \quad (8)$$

T_{S1} 、 T_{S2} 的关系为:

$$T_{S2} = \frac{T_S}{2} - T_{S1} \quad (9)$$

由 (7)、(8)、(9) 式可得:

$$\begin{cases} T_{S1} = \frac{T_S}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{V_a}{V_m} \right) \\ T_{S2} = \frac{T_S}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{V_a}{V_m} \right) \end{cases} \quad (10)$$

设开关管的占空比为 d 则

$$dT_S + d'T_S = \frac{T_S}{2} \quad (11)$$

若要实现开关的 ZVS 导通, 需要满足

$$d'T_S \leq T_{S2} \quad (12)$$

把式 (10)、(11) 代入 (12) 得

$$\frac{1}{4} + \frac{V_a}{2V_m} \leq d < \frac{1}{2} \quad (13)$$

变压器漏感 L_p 为

$$L_p = \frac{1}{2} \frac{T_{S1}V_{Lp1}}{I_{Lp}} = \frac{1}{2} \frac{T_{S2}V_{Lp2}}{I_{Lp}} \quad (14)$$

结合 (8) 式和 (10) 式得:

$$L_p = \frac{T_S}{4V_m I_{Lp}} (V_m^2 - V_a^2) \quad (15)$$

一般, 半桥变换器中的变压器原边电压 V_a 满足如下关系:

$$V_a \leq \frac{V_m}{2} \quad (16)$$

根据式 (6) 可得到变压器的匝比为

$$\frac{n_s}{n_a} = \frac{V_{SC} + V_d}{2V_a} \quad (18)$$

3 仿真与实验

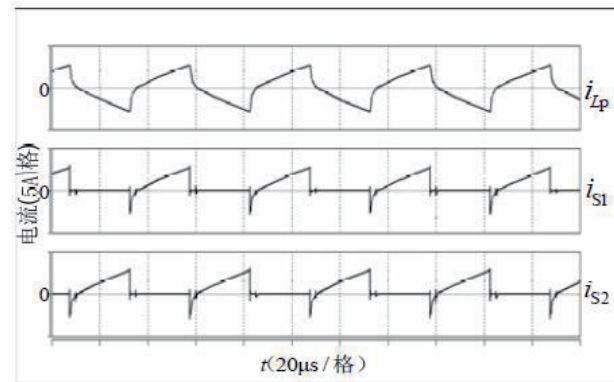
利用 Saber 仿真软件对图 1 所示的均压原理图进

行了仿真, 仿真参数如下: $V_{in}=10.8V$, 开关频率为 $f=20kHz$, S_1 和 S_2 为 MOSFET 功率开关管, 占空比为 0.48, 二极管的压降为 $V_D=0.36V$, $C_1=C_2=1000\mu F$, 变比为 $n_a=n_b=n_c=51:15:15$, 耦合系数均为 0.96, 超级电容参数如表 1 所示, 仿真结果如图 5 所示。

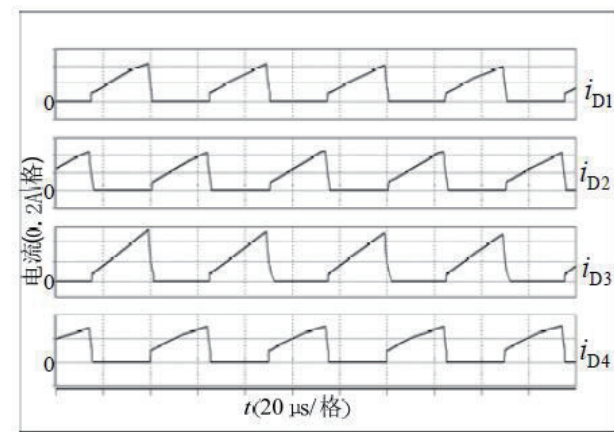
表 1 超级电容参数

Tab.1 Supercapacitor Parameters

名称 参数	SC ₁	SC ₂	SC ₃	SC ₄
额定电压 (V)	2.7	2.7	2.7	2.7
容量 (F)	29	29.5	30	31
ESR (mΩ)	100	110	115	105
初始电压 (V)	1.3	1	0.6	1.6



(a) 流过漏感以及开关管的电流波形



(b) 流过二极管的电流波形

图 5 电流仿真波形

Fig.5 Simulation waveform of current

图 5(a) 表明漏感电流 i_{Lp} 在一个周期内成对称的正负两部分, 开关 S_1 和开关 S_2 交替导通且能实现 ZVS 导通。因为超级电容 SC_3 的初始值最小, 与变压器二次侧的电压差最大, 因而流过二极管 D_3 的电流最大, 如图 5 (b) 所示。

图 6 为超级电容器仿真均压曲线, 因为超级电容器的串联等效电阻很小, 在给超级电容充电的初始时刻, 会出现一个比较大的充电电流, 使超级电容器的初始电压发生改变, 因而图 (6) 中的初始时刻的超级电容去电压并不是初始时刻给定的电压, 从图 (6) 可知, 约 13s 时, 四个超级电容器的电压达到均衡。

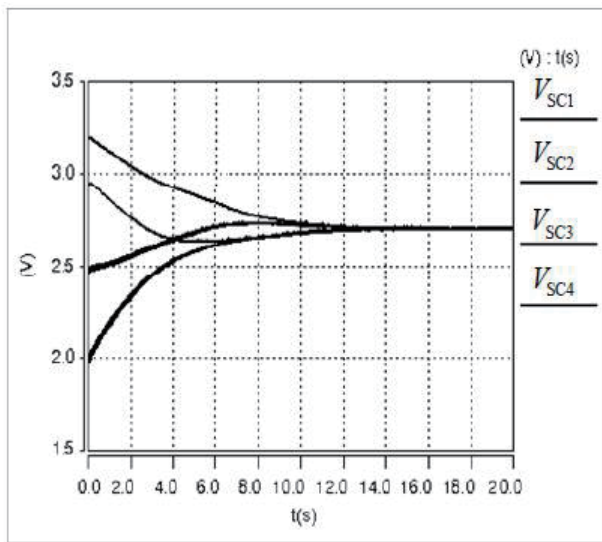
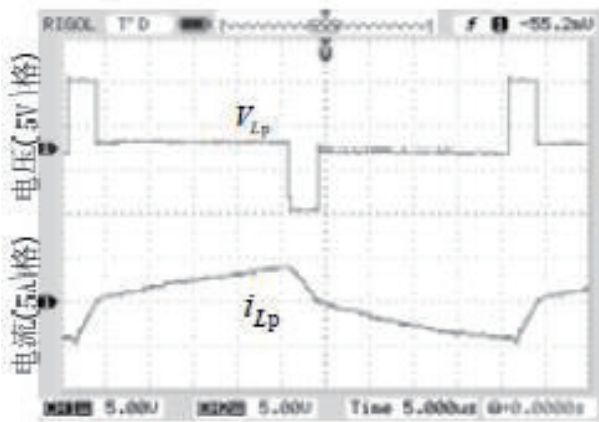
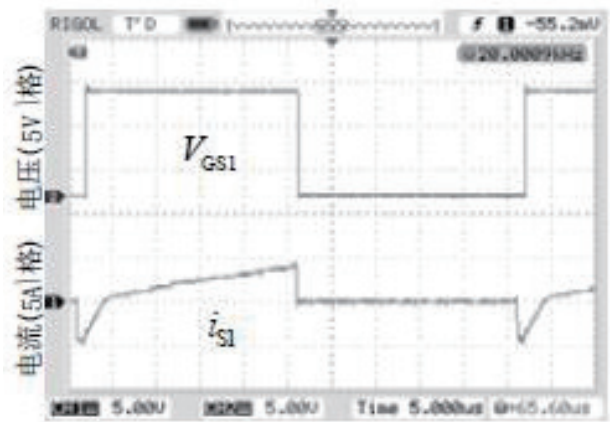


图 6 超级电容仿真均压曲线

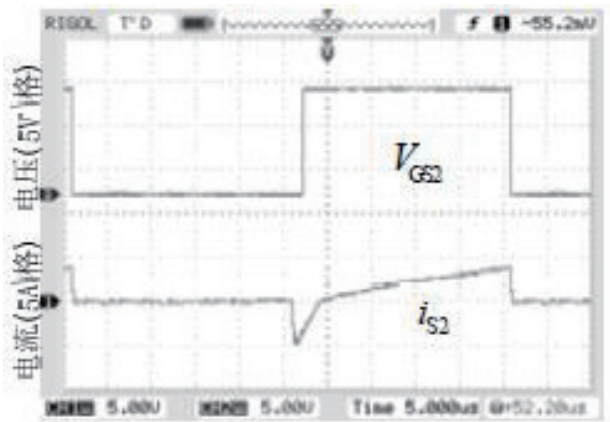
Fig.6 The simulation curve of Supercapacitor equalization



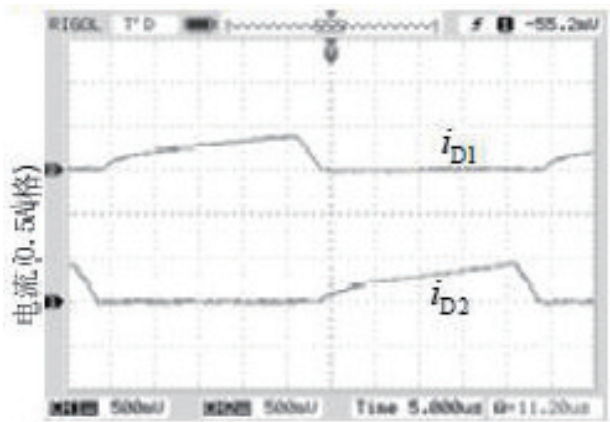
(a) 漏感 L_p 的电压 / 流波形



(b) 开关 S_1 触发脉冲电流波形



(c) S_2 的触发脉冲及电流波形



(d) 二极管 D_1 , D_2 电流波形

图 7 实验波形

Fig.7 The experimental waveform

实验采用的超级电容器为锦州凯美公司生产的 HP-2R7-J307UY, 单体容量为 30F, 额定电压为 2.7V, 开关管为 MOSFETIRF540, 二极管采用 MBR20100CT。工作频率和占空比分别为 20KHz 和 0.48, V_{in} 设置为 10.8V。图 7 为实验测得的波形图, 实验结果与理论分析以及仿真相一致, 两个开关 S_1 和 S_2 均可以实现 ZVS 导通, 二极管 D_1 (D_3) 和 D_2 (D_4) 交替导通, 实现超级电容器的均压。

4 结论

超级电容器因其容量, 等效串联内阻等不同, 在串联使用时会导致单体电压不均衡, 影响超级电容器的使用寿命和可靠性, 本文介绍了一种基于半桥变换器和首尾次序耦合变压器的均压电路, 变压器原边绕组并联, 副边绕组首尾相接, 能够实现超级电容器的自主电压均衡, 通过分析均压的原理, 得到了适用于此电路的占空比以及变压器的匝比, 仿真和实验结果验证了该电路具有良好均压特性。

参考文献

- [1] 许爱国, 谢少军 (Xu Aiguo, Xie Shaojun) 串联电容器动态电压均衡技术研究 (.Dynamic Voltage Equalization Technique for Series Connected Ultra-capacitors) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30(12)
- [2] M.Uno, "Interactive charging performance of a series connected battery with shunting equalizers", in Proc. IEEE, Int. Telecommun. EnergyConf. Oct. 2009, 1-4.
- [3] 封世领, 刘强, 李志强 (Feng Shiling, Liu Qiang, Li Zhiqiang). 基于 FPGA 的超级电容器均衡充电电路设计与实现 (Charging equalization circuit design and implement for ultra-capacitors based on FPGA) [J]. 电源技术 (Power Technology), 2011, 35(05): 540-542.
- [4] 王东 (Wang Dong). 超级电容储能系统电压均衡技术的研究 (.Research on Voltage Balance of Supercapacitor Storage Energy System) [D]. 大连理工大学 (Dalian University of Technology), 2008.
- [5] 张彬, 刘君, 穆世霞 (Zhang Bin, Liu Jun, Mu Shixi). 超级电容器串联技术的研究 (Study on the Technique of Super-capacitors Connected in Series) [J]. 电气技术 (Electrical Engineering), 2009, 09: 46-49.
- [6] 李海冬, 冯之钺, (Li Haidong, Feng Zhiyue). 一种新颖的串联超级电容器组的电压均衡方法 (.A novel voltage balancing method for series connected supercapacitor strings) [J]. 电源技术 (Power Technology), 2006, 30 (6): 499- 503.
- [7] 李海冬, 齐智平, (Li Haidong, Qi Zhiping). 超级电容器电力储能系统的电压均衡策略 (.Voltage Balancing Strategy for Supercapacitor Power Storage System) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2007, 31(03): 19-23,34.
- [8] 郭军, 刘和平, 徐伟, 刘平 (Guo Jun, Liu Heping, Xu Wei, Liu Ping). 纯电动汽车动力锂电池均衡充电的研究 (.Charge equalization of Li-ion battery for electric vehicles) [J]. 电源技术 (Power Technology), 2012, 04: 479-482.
- [9] 孙朝 (Sun Chao). 锂电池组均衡充电与管理系统设计 (Design of Li-Battery Charging Equalization Management System) [D]. 重庆大学 (Chongqing University), 2013.

作者简介:

李洪珠:(1974—), 男, 副教授, 博士研究生。主要从事电力电子和电力系统领域的研究。

张垒:(1990—), 男, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 主要从事电力电子和电力系统领域的研究。

孙佳月:(1990—), 女, 辽宁葫芦岛人, 硕士研究生, 主要从事电力电子和电力系统领域的研究。