

文章编号: 1006-4710(2011)04-0456-05

基于双向 DC-DC 变换器的超级电容器储能系统研究

杨惠, 孙向东, 钟彦儒, 陶柳英, 张鹏程

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 介绍了超级电容器的经典 RC 模型, 详细分析了双向 DC-DC 变换器的工作原理及控制策略。构建了基于双向 buck-boost 电路的超级电容器储能系统模型, 并进行了验证实验。实验结果表明不论是模拟直流母线电压波动实验还是单相两级式光伏发电系统突加、突减负载实验, 超级电容器都能够工作在优化的充放电状态, 使得储能系统能够很好地抑制直流母线电压波动, 从而提高整个系统的稳定性。

关键词: 超级电容器; 储能; 双向 DC-DC 变换器; 波动抑制

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A

Research on a Supercapacitor Energy Storage System Based on Bi-Directional DC-DC Converter

YANG Hui, SUN Xiangdong, ZHONG Yanru, TAO Liuying, ZHANG Pengcheng

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The classical RC model of a supercapacitor is presented. The work principle and control strategy of the bi-directional DC-DC converter are analyzed in detail. The supercapacitor energy storage system on the basis of the bi-directional buck-boost converter is developed and experimental study is carried out. The experimental results show that the supercapacitor can operate in the optimal charge or discharge state and the energy storage system can restrain effectively the DC-bus voltage fluctuation so that the system stability is improved no matter when the hardware simulation is implemented or when the load changes suddenly in the single-phase two-stage PV generation system.

Key words: supercapacitor; energy storage; bi-directional buck-boost converter; fluctuation control

超级电容器亦称双电层电容器, 是 20 世纪 60 年代发展起来的一种新型储能元件。与常规电容器不同的是它的容量可达到法拉级甚至千法拉级, 且具有功率密度高, 充放电速度快, 寿命长, 工作温度范围宽, 可靠性高以及无污染等特点。超级电容器的出现填补了传统静电电容器和化学电源之间的空白, 并以优越的性能及广阔的应用前景而受到了许多国家的重视^[1-2]。由于超级电容器储能密度大, 且能快速地吸收和释放能量, 因而在光伏发电、风力发电等分布式发电系统中对提高电能质量的作用重大。当分布式发电系统出现电压波动、大电网短时

间供电中断等情况时, 超级电容器可快速充放电以改善负荷电压, 从而保证系统的安全性和可靠性^[3-4]。

本研究将非隔离型双向 buck-boost 电路应用到超级电容器的充放电过程中, 采用电压电流双闭环控制策略, 有效地抑制系统直流母线电压的波动。

1 超级电容器储能系统

分布式发电系统的结构如图 1 所示。由分布式发电电路、超级电容器储能系统、逆变电路及负载组成。简化的储能系统如图 1 中的虚线框所示, 主要

收稿日期: 2011-09-02

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2009JM7008); 陕西省教育厅专项基金资助项目(09JK651, 09JK647); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目。

作者简介: 杨惠(1978-), 女, 陕西咸阳人, 博士生, 研究方向为电力电子与电力传动及新能源发电技术。E-mail: ivyyang@xaut.edu.cn。孙向东(1971-), 男, 辽宁辽中人, 教授, 博士, 研究方向为现代交流调速、新型电力电子装置及新能源发电系统。E-mail: sxd1030@163.com。

由超级电容器组和双向 DC-DC 电路组成。由于超级电容器单体的额定电压一般只有 1~3 V,所以,必须通过超级电容器串并联组合构成超级电容器组才能满足实际系统对电压和能量等级的需要^[5]。当系统的直流母线电压高于额定值时,双向 DC-DC 电路工作在降压模式,超级电容器组处于充电状态,从而将多余的能量储存起来。当直流母线电压低于额定值时,双向 DC-DC 电路工作在升压模式,超级电容器组处于放电状态,为负载提供能量。

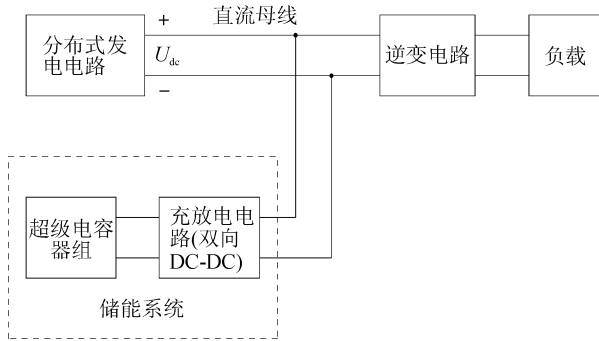


图 1 含有超级电容器储能系统的分布式发电系统
Fig. 1 Distributed power generation system with a supercapacitor energy storage system

1.1 超级电容器的数学模型

超级电容器由于内部电阻和电容的形成机理比较复杂,因此相关文献提出了很多超级电容器的应用模型,其中,RC 电路模型是最简单的一种(见图 2(a))。它包括理想电容器 C、等效串联内阻 R_s 和等效并联内阻 R_p 。等效串联内阻 R_s 表示超级电容器的总串联内阻,在充放电过程中会产生能量损耗,该损耗一般以热的形式表现出来。此外, R_s 的存在还会使端电压出现波动,进而产生电压纹波。等效并联内阻 R_p 反映了超级电容器总的漏电情况,一般只影响长期储能过程,称为漏电电阻。超级电容器自放电回路的时间常数长达数十小时甚至上百小时,远远高于充放电的时间常数。而且,在实际应用中超级电容器一般通过功率变换器与电源连接,并处于较快的和频繁的充放电循环过程中,因此, R_p 影响可以忽略^[6]。因而,可以进一步将超级电容器模型简化为理想电容器和等效串联内阻的串联结构(见图 2(b))。

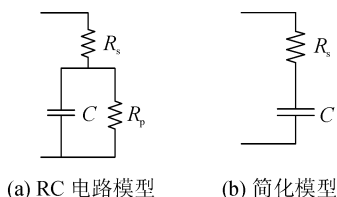


图 2 超级电容器模型

Fig. 2 Equivalent model of supercapacitor

当超级电容器以恒定电流 I 放电时,电量 Q 等于容量 C 与额定时间内的电压降 ΔU_c 的乘积,如式(1)所示。因此,可以根据式(2)计算出超级电容器组的容量值。

$$Q = C \cdot \Delta U_c = I \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$C = \frac{I \cdot \Delta t}{\Delta U_c} \quad (2)$$

1.2 非隔离型双向 buck-boost 电路

本研究采用图 3 所示的非隔离型双向 buck-boost 电路作为超级电容器储能系统的充放电电路。该电路元器件数量少,造价低廉,没有变压器损耗,效率高,易于包装和集成^[7-8]。

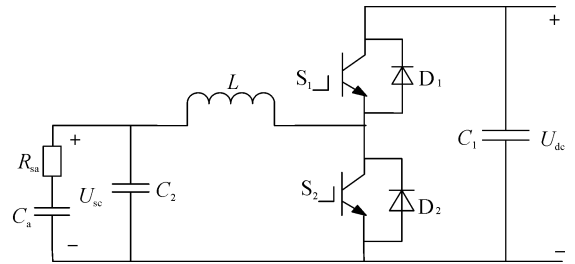


图 3 非隔离型双向 buck-boost 变换器
Fig. 3 The non-isolated bi-directional buck-boost converter

该电路能够实现两象限运行,即变换器两端电压方向不变,电流方向可变,在功能上相当于 buck 变换器和 boost 变换器的组合。当开关管 S_1 以一定占空比开关, D_2 为续流二极管时,变换器等效为 buck 变换器,能量由 U_{dc} 流向 U_{sc} ,超级电容器组吸收能量;当开关管 S_2 以一定占空比开关, D_1 为续流二极管时,变换器等效为 boost 变换器,能量由 U_{sc} 流向 U_{dc} ,超级电容器组释放能量。换言之,当直流母线电压升高或降低时,通过控制两个开关管的通断即可实现超级电容器组的储能或释能,从而抑制直流母线电压的波动^[9]。

1.3 控制策略

超级电容器储能系统主要的目的是稳定直流母线电压,并且要求在系统工作时能够通过控制电感电流来控制超级电容器组的充电电流和放电电流。因此双向 buck-boost 变换器采用直流母线电压外环控制和电感电流内环控制的控制策略。在 buck 工作模式下,超级电容器组处于充电状态,此时超级电容器类似短路状态,充电电流可以达到很大值,因此采用电感电流内环控制使超级电容器组的充电电流得以控制,在限制充电电流的同时,保护开关管。在 boost 工作模式下,超级电容器组放电,电感电流内环控制实现了对超级电容器组放电电流的控制。

非隔离型双向 buck-boost 电路的控制框图见图 4。图中直流母线电压给定值 U_{dc}^* 与实际输出电压 U_{dc} 的偏差通过 PI 电压调节器进行调节, 最终得到电流的给定值 I_L^* 。 I_L^* 与实际电感电流信号 I_L 的偏差通过 PI 电流调节器所得到的输出, 经过脉宽调制产生双向 DC-DC 变换器开关器件的控制信号。

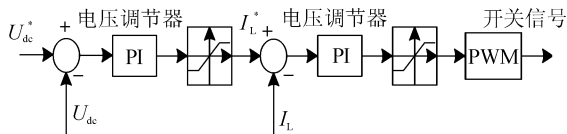


图 4 双向 buck-boost 电路的控制框图

Fig. 4 The control diagram of the bi-dictionary buck-boost converter

图 5 为超级电容器组充放电的控制流程图。可以根据直流母线电压的平均值与额定值之间的关系来判断超级电容器组是充电状态还是放电状态。

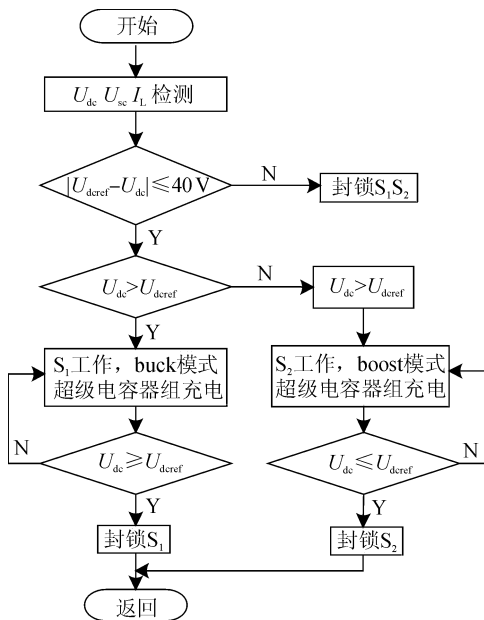


图 5 超级电容器组充放电的控制流程图

Fig. 5 Flow chart of charging and discharging control of the supercapacitors

2 系统实验分析

2.1 模拟实验

用单相二极管整流电路模拟直流母线电压波动, 利用超级电容器储能系统抑制其波动, 将其直流母线电压稳定于 100 V。超级电容器组由 50 支 1 800 F/2.7 V 超级电容器串联组成, 总容量值为 36 F, 总额定电压为 135 V, 总串联等效内阻为 35 mΩ。模拟实验原理框图见图 6。

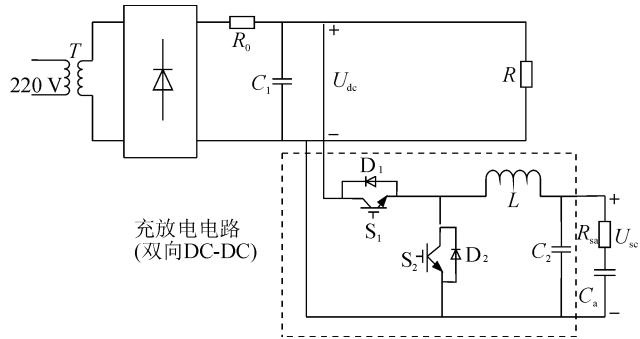


图 6 模拟直流母线电压波动的实验原理框图

Fig. 6 The experimental block diagram for the DC-bus voltage fluctuation

图 7 为直流母线电压正负波动 10% 且波动频率为 100 Hz 时, 超级电容器储能系统动作前后的直流母线电压 U_{dc} 、超级电容器组电压 U_{sc} 以及电感电流 I_L 的实验波形。从图 7 可以看出, 储能系统动作之前直流母线电压在 90 ~ 110 V 之间波动, 当超级电容器储能系统开始工作后, 直流母线电压的波动迅速减小, 且稳态时直流母线电压的峰峰值均接近 100 V, 波动范围由原来的 $\pm 10\%$ 缩小为约 $\pm 3\%$, 抑制直流母线电压波动的目的得以实现。而同时超级电容器组处于接近恒流充放电的交替工作状态, 当直流母线电压高于 100 V 时超级电容器组恒流充电, 电容组电压上升, 吸收能量。当直流母线电压低于 100 V 时超级电容器组恒流放电, 电容组电压下降, 释放能量。

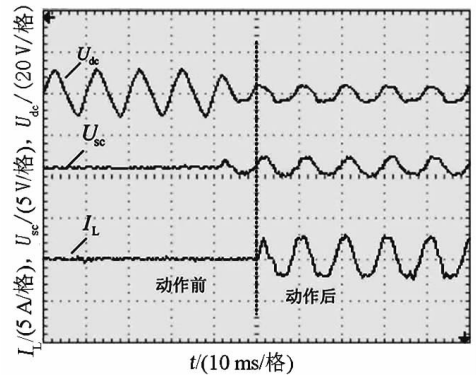


图 7 直流母线电压正负波动 10% 时的实验波形

Fig. 7 The experimental waveforms with $\pm 10\%$ fluctuation of the DC-bus voltage

2.2 储能系统在单相光伏发电系统中的应用

将超级电容器储能系统应用于实际的单相两级式光伏发电系统, 实验系统的结构如图 8 所示。整体系统由单相两级式光伏发电系统和超级电容器储能系统两大部分组成。超级电容器组参数与模拟实验一致, 光伏电池板的参数为: 标准条件下最大功率 85 W, 开路电压 22.2 V, 短路电流为 5.15 A, 最大功率点下最优工作电压为 17.8 V, 最优工作电流为 4.8 A。实验中将 10 块光伏电池板进行串联, 对应的

最大功率为 850 W。

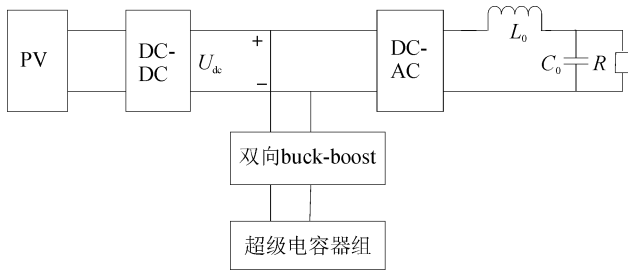


图 8 储能系统应用于单相光伏发电系统的总体框图
Fig. 8 General block diagram when the energy storage system is used in the single-phase grid-connected PV generation system

图 9 为单相光伏发电系统突加负载(即实际负载电阻阻值由 16 Ω 变为 8 Ω)时超级电容器储能系统工作前后的直流母线电压 U_{dc} 、光伏阵列输出电压 U_{PV} 以及逆变输出电流 I_{inv} 波形。

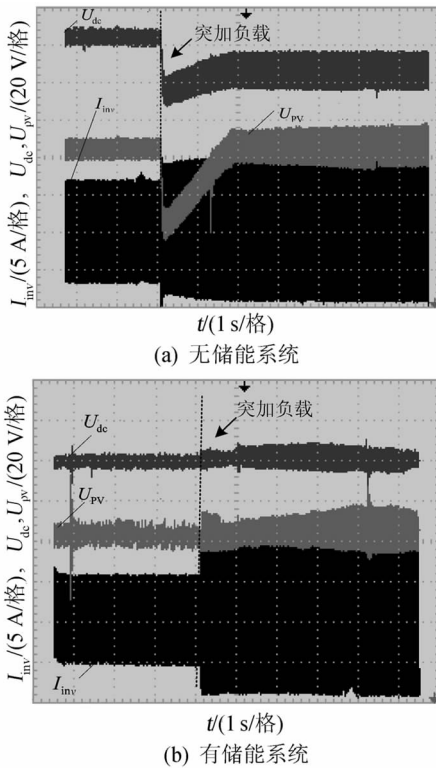


图 9 突加负载时储能系统工作前后的实验波形
Fig. 9 The experimental waveforms when the load becomes heavy suddenly

由图 9(a) 的无储能系统波形可以看出,单相两级式光伏发电系统突加负载时, U_{dc} 和 U_{PV} 都会突降,同时 I_{inv} 增大。由图 9(b) 可见,系统突加负载时,有储能系统的情况不会发生电压突降,可以将 U_{dc} 稳定在给定值 100 V 附近。并且 U_{PV} 也没有突降。由于突加负载时电阻减小,而直流母线电压基本不变,因此逆变输出电流增大。

图 10 为单相光伏发电系统突减负载(即实际负载电阻阻值由 8 Ω 变为 16 Ω)时超级电容器储能系统工作前后的直流母线电压 U_{dc} 、光伏阵列输出电压 U_{PV} 以及逆变输出电流 I_{inv} 波形。

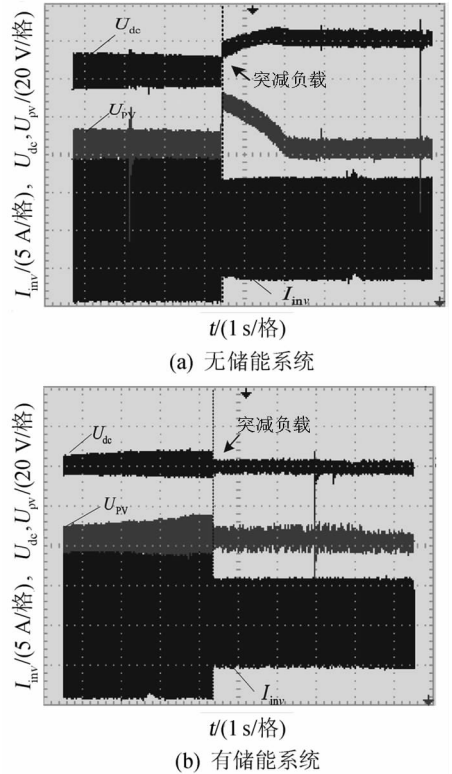


图 10 突减负载时储能系统工作前后的实验波形
Fig. 10 The experimental waveforms when the load becomes light suddenly

由图 10(a) 的可以看出,系统突减负载,即系统输出功率减小时 U_{PV} 会突升,动态过程结束后, U_{PV} 又回到原来的值。同时 U_{dc} 增大, I_{inv} 减小。由图 10(b) 可以看出,系统突减负载,有储能系统情况下不会发生电压突升,系统可以将 U_{dc} 稳定在给定值 100 V 附近,并且 U_{PV} 也没有发生突升。由于突减负载时电阻增大,而直流母线电压基本不变,因此逆变输出电流减小。

3 结论

本研究在介绍超级电容器等效模型的基础上,深入研究了基于非隔离型双向 buck boost 电路的超级电容器储能系统。利用模拟实验和实际的单相两级式光伏发电系统实验证明,采用直流母线电压外环、电感电流内环的控制策略可以在各种扰动条件下保证直流母线电压峰值处于给定值附近,从而有效地抑制直流母线电压的波动,提高整个系统的运行性能。

参考文献:

- [1] 胡毅,陈轩恕,杜砚,等. 超级电容器的应用与发展[J]. 电力设备,2008,9(1):19-22.
Hu Yi, Chen Xuanshu, Du Yan, et al. Development and application of super condenser [J]. Electrical Equipment, 2008,9(1):19-22.
- [2] Aewatert B, Cygan P J, Leung F C. Man portable power needs of the 21st century [J]. Power Sources, 2000, 91: 27-36.
- [3] 王云玲,曾杰,张步涵,等. 基于超级电容储能系统的动态电压调节器[J]. 电网技术,2007,31(8):58-61.
Wang Yunling, Zeng Jie, Zhang Buhan, et al. Dynamic voltage conditioner based on ultracapacitor energy storage system [J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 58-61.
- [4] 鲁蓉,张建成. 超级电容器储能系统在分布式发电系统中的应用[J]. 电力科学与工程,2006,(3):63-67.
Lu Rong, Zhang Jiancheng. Application of super capacitor energy storage system to distributed generation system [J]. Electric Power Science and Engineering,2006,(3): 63-67.
- [5] 王东. 超级电容器储能系统电压均衡的研究[D]. 大连: 大连理工大学,2008.
Wang Dong. Research on Voltage Balance of Supercapacitor Storage Energy System[D]. Da Lian:Dalian University of Technology, 2008.
- [6] 李海东. 超级电容器模块化技术的研究[D]. 北京:中国科学院,2006.
Li Haidong. Study on Supercapacitor Modular Technology [D]. Bei Jing: Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [7] 张慧妍,齐智平,韦统振. 超级电容器储能直流变换器的设计[J]. 电气应用,2006,25(12):97-99.
Zhang Huiyan, Qi Zhiping, Wei Tongzhen. Design DC-DC converter for ultracapacitor energy storage [J]. Electrotechnical Application, 2006,25(12):97-99.
- [8] 劳斯佳,尹忠东,单任仲. 超级电容器储能控制技术研[J]. 电源技术,2009,33(4):269-272.
Lao Sijia, Yin Zhongdong, Shan Renzhong. Study on energy storage control of supercapacitor[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009,33(4):269-272.
- [9] 张方华,朱成花,严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):46-49.
Zhang Fanghua, Zhu Chenghua, Yan Yangguang. The controlled model of bi-directional DC-DC converter [J]. Proceedings of the Csee, 2005,25(11):46-49.

(责任编辑 李虹燕)