

基于磁集成结构 DC-DC 变换器的超级电容储能系统

夏向阳¹,孔祥霖¹,帅智康²,周 云¹,蒋诗瑶¹,彭潇琪¹

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410012)

摘要: 针对电力驱动设备用电的波动性,提出一种新型磁集成的超级电容储能系统应用于电力驱动设备。该储能系统采用新型磁集成结构的 DC-DC 变换器,该变换器能较大地减少磁件体积和电流脉动,自身损耗小。储能系统在给设备提供足够电能的同时,还可以稳定供给电压,优化电能质量。通过 MATLAB/Simulink 仿真和实验结果表明,该储能系统能够很好地跟踪负载电流,及时补充欠缺电能,吸收多余电能,在负载阶跃变化时,直流母线电压变化不超过额定电压的 3.33%,与传统解决方案相比,该系统具有更好的性能和工程实用价值。

关键词: 超级电容; 磁集成结构; 储能; 电能质量; 电力驱动设备; DC-DC 变换器

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.015

0 引言

现今大功率的电力驱动设备,如电梯、起重机、牵引机械等直流电机对供给电能提出了越来越高的要求:高的峰值功率、更佳的电能质量、更稳定可靠的电能供给。一般的解决方案是配备一个不间断电源 UPS(Uninterruptible Power Supply)作为后备补充。传统的 UPS 多以蓄电池作为储能主体,但是蓄电池本身有最大电流的限制,不能快速响应,且体积庞大,造价昂贵,无法大规模应用。

超级电容相比于蓄电池,以其超高的功率密度和最大电流,可以迅速满足负载短期的功率要求^[1-2],并且充电快捷,在负载功率波动频繁的场所,也能运作良好。因此采用超级电容更适应电力驱动设备等的瞬间功率变化需要。

DC-DC 变换器作为储能系统与负载和电源之间的连接模块,是整个储能系统能否高效率、稳定运行的关键,一般采用双向升降压 DC-DC 变换器(Buck-Boost Converter)或者 Cuk 变换器^[3-5]。此类变换器在传输高功率时,需要配备体积庞大的电感。而磁集成技术,就是将变换器中的 2 个或多个分立磁件 DM(Discrete Magnetics)绕制在一副磁芯上,从结构上集中在一起^[6-8],集中后的磁件被称为集成磁件 IM(Integrated Magnetics)。通过一定的耦合方式、合理的参数设计,该技术能有效减小磁件体积和损耗,在

一定的应用场合还可减小电源输出纹波,提高输出动态性能^[9-14]。磁集成技术还能减少连接端,可有效减少大电流场合连接端子的损耗^[15-19]。

针对以上情况,本文提出了一种新型磁集成的超级电容储能系统并给出了具体拓扑结构图,具体介绍了磁集成技术运用在此系统中的优势,满足电力驱动设备的要求。该系统能够满足电力驱动设备峰值功率时的需求,同时起到备用电源的作用,与传统的 DC-DC 变换器相比,采用磁集成技术的 DC-DC 变换器,通过磁件与磁件之间的耦合,能有效减少变换器中磁件的体积和输出电流的纹波。最后本文运用 MATLAB 软件进行了仿真验证,并通过实验验证此方案的可行性。

1 超级电容储能系统

1.1 储能系统结构

图 1 为所提出的 DC-DC 变换器与超级电容配合储能系统。变换器由 3 个 MOSFET 开关 $V_{T1}-V_{T3}$ 与其相对应的二极管 $V_{D1}-V_{D3}$ 、磁集成结构(自感电感 L_1 、 L_2 和互感 M)构成。通过 3 个开关、二极管和磁集成结构相互配合,构成双向 DC-DC 变换器。耦合电感的使用,可以更进一步地减少双向变换器最庞大和昂贵的部件。该变换器有 4 种主要的工作

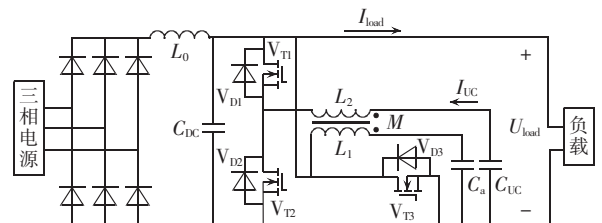


图 1 超级电容储能系统拓扑结构图
Fig.1 Topology of super-capacitor energy storage system

收稿日期:2013-11-20;修回日期:2014-10-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207048);湖南省自然科学基金资助项目(2011JJ5027);湖南省科技计划项目(2014-GK3006);湖南省质量技术监督局科研项目(2014KYJH37)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207048),Hunan Provincial Natural Science Foundation(2011JJ5027),Hunan Science and Technology Program(2014GK3006) and Hunan Provincial Quality and Technical Supervision of Research Project(2014KYJH37)

模式:

模式 1 在降压模式运行下通过直流环节给超级电容充电;

模式 2 在升压模式运行下通过超级电容输电至直流母线侧;

模式 3 降压模式下从直流母线侧将制动能量输入超级电容,再生制动;

模式 4 升压模式下,当交流侧出现故障中断时,由超级电容提供备用电源,供给电力驱动设备短时持续运作。

模式 1 与模式 3 相似,直流环节与直流母线可当作相同,模式 2 与模式 4 相似,所以可将 4 种模式归纳为 2 种主要工作模式。

将磁集成结构应用于该储能系统中,如图 1 所示,引入了耦合电感,通过电感的耦合,当电感 L_1 中通过电流时,会在电感 L_2 上产生耦合电压,起到分压作用,因此该耦合电感能够提供更好的纹波消除功能。在较低的电流纹波下,电磁接口滤波器可以更小或者不使用,同时可以优化开关频率,减少开关损耗。通过设计精巧的磁性元件,开关和其他转换器组件设备上的电压应力可以显著降低,从而减少了开关因电压应力过大造成损坏的概率,增加了储能系统的稳定性。再者,使用了耦合电感的变换器可以减少输入电流和输出电压的纹波,对于负载变化反应更灵敏,且能减少去耦电容的数量。

1.2 降压模式下给超级电容充电

图 2 为降压模式下给超级电容充电的电流流向图。如图 2 所示,此模式包含超级电容直接从电网充电以及回收制动能量充电 2 种情况。在充电过程中,开关 V_{T1} 、二极管 V_{D2} 与电感 L_2 一起组成一个降压变换器。当 V_{T1} 闭合时,电流从直流环节(电网侧或负载侧)流入 V_{T1} 和 L_2 ,电感 L_2 充电;当 V_{T1} 断开时, V_{D2} 导通,储存于电感 L_2 中的电能经由二极管 V_{D2} 对超级电容进行充电。图 2 中实线为充电电能来源,虚线为 DC-DC 变换器内电能的传输方向。

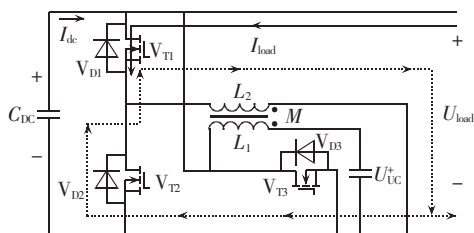


图 2 降压模式下超级电容充电电流流向图
Fig.2 Direction of super-capacitor charging current in Buck mode

1.3 升压模式下超级电容放电

当满负荷运转或者电力驱动设备加速时,需要大量电能,此时由超级电容辅助电力驱动设备,为其提供额外的电能,稳定负载侧电压,使电力驱动设备

工作在较佳状态。

图 3 为超级电容放电时的电流流向图,图中,电感 L_2 、开关 V_{T2} 与二极管 V_{D1} 构成升压变换器,电能由超级电容传输至负载侧。当 V_{T2} 闭合时,超级电容放电,电感 L_2 充电;当 V_{T2} 断开时, V_{D1} 导通,储存于电感 L_2 中的电能和超级电容中的电能经由 V_{D1} 流向负载侧。图中虚线为变换器内电流流向,实线为外部电能流向。

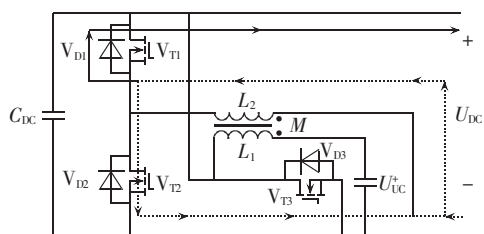


图 3 升压模式下超级电容放电电流流向图
Fig.3 Direction of super-capacitor discharging current in Boost mode

2 基于磁集成结构的 DC-DC 变换器

常见的磁性元件,如电感,是能量转换与滤波、储能和电气隔离方面的主要元件。磁性元件的大小是影响变换器体积和重量的主要因素。据统计,磁性元件的重量占变换器重量的 30%~40%,体积占总体积的 20%~30%,而在高频工作和模块化设计中,磁性元件占比更高。磁性元件的损耗影响变换器的效率。磁性元件的寄生参数对开关管的电压、电流应力有很大的影响。

为了减小磁性元件的体积、重量,改善滤波性能,通常采用提高频率的办法,但高频率下有如下缺陷:频率提高会受到整机效率的限制;磁芯的利用率低,磁体体积大。

采用磁集成技术不但能够减小磁性元件的体积、重量,还能减小电流纹波,降低磁性元件损耗,改善电源动态性能,对提高电源的性能及功率密度有重要意义。

图 1 中开关 V_{T3} 、电感 L_1 与二极管 V_{D3} 构成一个升压变换器,保持外加电容 C_a 的循环电流,使 C_a 保持与负载侧电压一致,由于耦合电感之间的互感影响,在电感 L_1 上产生互感电压以及少量的电能,电能储存于电容 C_a 中。如图 1 所示,稳态时,在不考虑电容电压脉动的情况下, C_a 上电压与输出电压相等,所以电感 L_2 与电感 L_1 上的电压满足电压成比例的条件,电感集成能减小输出电流脉动,合理设计参数可实现输出零纹波。

表 1 为磁集成结构的磁件与 2 个分立电感的体积和重量比较,可知,磁集成结构表面积减少约 25.39%,磁芯体积减少约 23.60%,磁芯重量减少约 25%,整体重量减少 13.33%,成本减少约 23.60%。

表 1 磁集成结构与分立电感比较

Table 1 Comparison between integrated magnetic structure and discrete inductors

特征	磁集成结构	2 个分立电感
表面积/cm ²	51	69.30
磁芯体积/cm ³	77.55	101.51
磁芯重量/kg	0.19	0.24
导线重量/kg	0.21	0.21

2.1 电感耦合模型

图 4 为电感耦合模型。

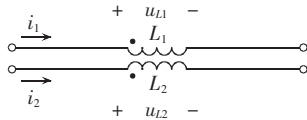


图 4 电感耦合模型

Fig.4 Model of inductive coupling

由图 4 有如下公式:

$$\begin{aligned} u_{L1} &= L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ u_{L2} &= L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, L_1 和 L_2 为每个绕组的自感; M 为互感。

上述公式还可以表示为:

$$\begin{aligned} u_{L1} &= L_1 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \right) \frac{di_1}{dt} - \frac{M}{L_2} u_{L2} \\ u_{L2} &= L_2 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \right) \frac{di_2}{dt} - \frac{M}{L_1} u_{L1} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 耦合系数为 $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ 。

2.2 超级电容模型

图 5 为超级电容的等效模型, 由内阻 R_s 、 C_{UC} 与并联电阻 R_p 组成, R_p 反映自放电电阻, 是唯一能有效反映超级电容的长期能源储存条件的参数。在运行时内阻是可以忽略的。超级电容的充电状态 SOC (State Of Charge) 为其瞬时端子电压 U_{UC} 与额定电压 U_{UC-N} 的比值:

$$SOC = U_{UC} / U_{UC-N} \quad (3)$$

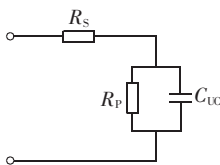


图 5 超级电容模型

Fig.5 Model of super-capacitor

3 控制策略

选用 MOSFET 作为 DC-DC 变换器的元件和一对电感相结合, 作为电力驱动设备与超级电容储能系统之间的连接。

级联电压与电流控制器是作为超级电容控制器的首选, 这主要是因为当电源供给平均负载电压时,

超级电容可以保持直流负载母线侧的电压。这样可以确保在制动过程中, 超级电容在直流母线侧电压显著增加时, 可以快速响应, 再生制动。图 6 为超级电容级联电压与电流控制器的控制框图。图中, U_{dc} 为直流侧实际电压; U_{dc-N} 为直流侧额定电压; i_{UC}^* 为超级电容电流标么值; i_{UC-N} 为超级电容额定电流; f_s 为开关频率; $G_{1,2}$ 为开关 V_{T1} 、 V_{T2} 的通断信号。

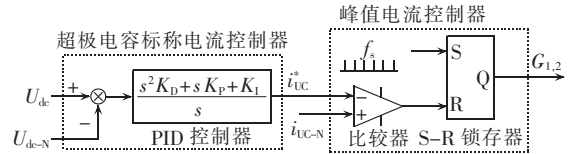


图 6 超级电容级联电压与电流控制器的控制框图

Fig.6 Block diagram of cascaded voltage and current controller for super-capacitor control

在升压模式下电感电流占空比的传递函数由下式定义:

$$\frac{I_{L2}(s)}{D(s)} = \frac{U_{dc} R_{load} C_{dc} s + 2U_{dc}}{R_{load} L_2 C_{dc} s^2 + L_2 s + R_{load} (1-D)^2} \quad (4)$$

其中, $I_{L2}(s)$ 为 L_2 的电流; U_{dc} 为直流环节电压; C_{dc} 为直流环节电容; D 为占空比。在频率范围内, 电感电流与母线电压之间的关系可用下式表示:

$$\frac{U_{dc}(s)}{I_{L2}(s)} = \frac{-L_2 s + R_{load} (1-D)^2}{R_{load} C_{dc} (1-D) s + 2(1-D)} \quad (5)$$

此方案在控制方面与传统方案相比更加简洁, 没有采用过多的 IGBT 或者 MOSFET, 在控制开关开断上, 无需运用太复杂的控制策略, 既可以获得很稳定的运行效果, 也能减少成本。

4 仿真与实验分析

为测试本装置的动态性能, 以及是否能达到预想的效果, 将在一个比较有代表性的电力驱动设备工作周期进行仿真。仿真模型使用 MATLAB 中的 Simulink、SimPowerSystems、Control System Toolbox 和 Signal Processing Blockset 工具。仿真系统详细参数如下: 直流环节额定电压 $U_{DC-N} = 220$ V, 超级电容额定电压 $U_{UC-N} = 125$ V, $C_{DC} = 4400$ μ F, $C_a = 2200$ μ F, $L_1 = 8.11$ mH, $L_2 = 550$ μ H, $M = 550$ μ H, 开关频率 $f_s = 15$ kHz, 采样时间 $T_s = 5$ μ s。

该仿真将对负载工作在重载、轻载、加速等工作状态下, 负载侧电压的稳定性、电流波动和超级电容电压进行观察。

如图 7 所示, 该储能系统中超级电容的电流能很好地跟踪负载电流, 维持负载母线侧电压的稳定。需要说明的是, 加入磁集成结构后, 负载与超级电容电流的不同, 是由于负载母线电压与储能设备之间端子电压的不同。

如图 8 所示, 在负载变化时, 总线电压变化不超

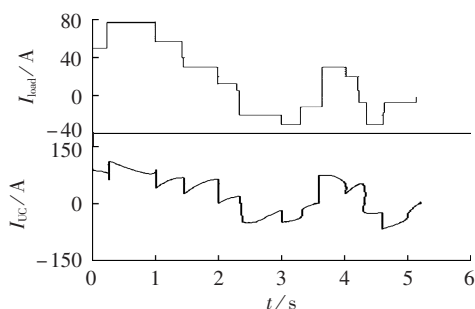


图 7 负载电流与超级电容电流波形

Fig.7 Waveforms of load current and super-capacitor current

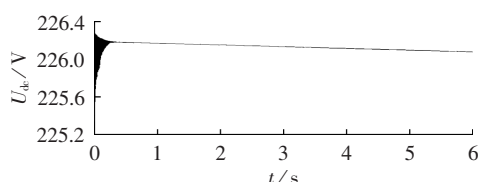
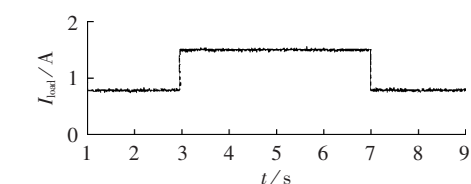


图 8 直流负载侧电压波形

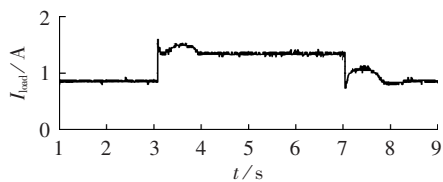
Fig.8 Voltage waveform at DC load side

过额定电压的 3.33%，在系统启动时，负载侧电压有一定的波动，很快进入稳态，在投入实时变动的负载后，电压有微小波动，有逐步下降趋势，但总体稳定在 220 V 以上，证明本装置的可行性和良好的性能。

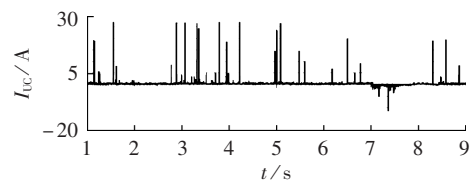
图 9 为在实验中设置负载阶跃变化，负载电流从 0.8 A 升高至 1.52 A，作为对应突然施加重载的情况下，负载和超级电容的电流实际变化图。图 9(a)为磁集成变换器在负载阶跃变化时负载侧的输出电流，电流波动很小，纹波占比小于 6%。图 9(b)为采用



(a) 采用磁集成变换器的负载电流



(b) 采用普通 DC-DC 变换器的负载电流



(c) 超级电容电流

图 9 负载阶跃变化时负载、超级电容的电流实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of load current and super-capacitor current during step change of load

普通 DC-DC 变换器和 UPS 在负载阶跃变化时的负载侧输出电流，电流有明显的突升突降状况，且纹波占比超过 10%。图 9(c)证明超级电容储能系统在应对重载和制动状况有着优良的处理能力。从图中可以看出， $t=3\text{ s}$ 时负载阶跃上升，超级电容迅速响应，短小时内多次大电流放电，补充负载侧所需的电能；在 $t=7\text{ s}$ 时负载阶跃下降，超级电容回收制动能量，此时超级电容电流值为负值。

5 结论

本文结合了一种新型的磁集成结构双向 DC-DC 变换器，将其应用在基于超级电容的储能系统，用于改善输入电力驱动设备的电能质量。利用磁集成结构良好的滤波性能和减小体积重量的特点，提高电力驱动设备工作稳定性和效率，达到很好的效果，能够广泛应用。同时利用超级电容再生制动，亦可作为重要电力驱动设备的备用电源，在节约能源的同时，提高供电稳定性，降低设备自身损耗。通过仿真与实验验证了该方案优于传统装置。

参考文献：

- [1] LIU Danwei, LI Hui. A ZVS bi-directional DC-DC converter for multiple energy storage elements[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1513-1517.
- [2] GRBOVIC P J, DELARUE P, le MOIGNE P, et al. A three-terminal ultracapacitor-based energy storage and PFC device for regenerative controlled electric drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 301-310.
- [3] 胡平, 谢顺依, 杨迎化, 等. 新型 ZVS 全桥 DC/DC 变换器[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 103-105.
HU Ping, XIE Shunyi, YANG Yinghua, et al. Novel full bridge ZVS DC/DC converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 103-105.
- [4] TAN N M L, ABE T, AKAGI H. Design and performance of a bidirectional isolated DC-DC converter for a battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 27(3): 1237-1248.
- [5] CUK S. A new zero-ripple switching DC-to-DC converter and integrated magnetics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1983, 19(2): 57-75.
- [6] 蒋赢, 潘俊民. 基于集成磁件的光伏升压移相全桥 DC/DC 变换器[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 84-89.
JIANG Ying, PAN Junmin. PV step-up PSFB DC/DC converter based on integrated magnetics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 84-89.
- [7] 陈乾宏, 阮新波, 严仰光. 开关电源中磁集成技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 1-7.
CHEN Qianhong, RUAN Xinbo, YAN Yangguang. The application of the magnetic-integration techniques in switching power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 1-7.
- [8] 刘学超, 张波, 丘东元, 等. 多相并联磁集成电压调整模块的电路建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 145-151.
LIU Xuechao, ZHANG Bo, QIU Dongyuan, et al. Modeling of

- multiphase parallel magnetic integrated circuit voltage regulator module[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19):145-151.
- [9] 乔蕾,刘永强. 磁集成技术及其在电力电子中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(3):34-38.
QIAO Lei,LIU Yongqiang. Integrated magnetic technology and its application in power electronic[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2005,17(3):34-38.
- [10] 王华凤,陈敏,徐德鸿. 并联型有源电力滤波器中磁集成技术的应用研究[J]. 电气应用,2006,25(12):80-84.
WANG Huafeng,CHEN Min,XU Dehong. Application of shunt active power filter with integrated magnetics[J]. Electrical Applications,2006,25(12):80-84.
- [11] CUK S. Modelling analysis and design of switching converters [D]. Pasadena,USA:California Institute of Technology,1976.
- [12] CUK S. A new optimum topology switching DC-to-DC converter [C]//Proceedings of 8th IEEE Power Electronics Specialists Conference. New York,USA:IEEE,1977:160-179.
- [13] 蔡宣三,龚绍文. 高频功率电子学[M]. 北京:科学出版社,1993:100-156.
- [14] 杨玉岗. 现代电力电子的磁技术[M]. 北京:科学出版社,2003:50-76.
- [15] LI Zhihao,ONAR O,KHALIGH A,et al. Design,control and power management of a battery/ultra-capacitor hybrid system for small electric vehicles[C]//SAE World Congress & Exhibition. Detroit,USA:SAE,2009:591-596.
- [16] FERREIRA A A,POMILIO J A,SPIAZZI G,et al. Energy management fuzzy logic supervisory for electric vehicle power supplies system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(1):107-115.
- [17] AMRHEIN M,KREIN P T. Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle system and subsystem interactions,including power electronics[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2005,54(3):825-836.
- [18] 梁帅奇,牟晓春,赵雪,等. 含有储能单元的微电网运行控制技术[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(4):74-79.
LIANG Shuaiqi,MOU Xiaochun,ZHAO Xue,et al. Operation and control techniques of micro-grids with energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2011,26(4):74-79.
- [19] 王姝,石晶,龚康,等. 多元复合储能系统及其应用[J]. 电力科学与技术学报,2013,28(3):32-38.
WANG Shu,SHI Jing,GONG Kang,et al. Composite energy storage systems and its applications[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2013,28(3):32-38.

作者简介:



夏向阳

夏向阳(1968—),男,湖南长沙人,教授,博士后,主要研究方向为分布式发电技术和电能质量控制(E-mail:xia_xy@126.com);
孔祥霖(1990—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为储能技术及其应用。

Super-capacitor energy storage system based on DC-DC converter with integrated magnetic structure

XIA Xiangyang¹,KONG Xiangji¹,SHUAI Zhikang²,ZHOU Yun¹,JIANG Shiyao¹,PENG Xiaoqi¹

(1. College of Electrical and Information Engineering,Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114,China;2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University,Changsha 410012,China)

Abstract: Aiming at the electricity fluctuation of electric driving equipment,a super-capacitor energy storage system is proposed,which adopts the DC-DC converter with integrated magnetic structure to greatly reduce the size and loss of magnetic component and the current pulse. The energy storage system provides enough power to equipment,stabilizes the supply voltage and optimizes the power quality. The results of simulation with MATLAB/Simulink and experiment show that,the proposed system follows the load current well,replenishes the energy lacked and absorbs the excessive energy timely. The DC bus fluctuation is less than 3.33% of rated voltage during step change of load. Compared with traditional schemes,the proposed system has better performance and practical value.

Key words: super-capacitor; integrated magnetic structure; energy storage; power quality; electric driving equipment; DC-DC converters