

超级电容器储能系统充电模式控制设计

马奎安, 陈 敏*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对电网供电系统存在用电负荷和电能供应不平衡问题,设计了超级电容器储能系统。对设计的超级电容器储能系统两种工作模式(充电储能模式和放电释能模式)进行了介绍,对超级电容器储能系统充电储能运行模式时的双向 DC/DC 变流器工作方式进行了分析,同时设计了闭环控制参数,从而实现了超级电容器储能系统充电储能过程的控制。实验结果表明,通过对双向 DC/DC 变流器在超级电容器充电工作模式时的闭环控制,有效地实现了对超级电容充电储能过程的控制。

关键词:储能;超级电容器;双向 DC/DC 变流器;充电控制

中图分类号:TM5;TP153

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)07-0085-04

Charge mode control design for super-capacitor energy storage system

MA Kui-an, CHEN Min

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of the unbalance between the load and the power supply in grid, the super-capacitor energy storage system was designed. The two operating modes(charge mode to store energy and discharge mode to release energy) of super-capacitor energy storage system designed were introduced. The bi-directional DC/DC converter operating mode, when super-capacitor energy storage system running in charge mode to store energy, was analyzed, and the closed-loop control parameter was designed to realize the control of the charging process. The experimental results show that through the closed-loop control designed for bi-directional DC/DC converter applied in super-capacitor energy storage system, the charging process of super-capacitor energy storage system to store energy can be effectively controlled.

Key words: energy storage; super-capacitor; bi-directional DC/DC; charging control

0 引 言

超级电容器作为近几十年来发展起来的新型储能元件,具有电容值大、充放电寿命长、能够快速充放电及比功率高等一系列优点,在混合动力汽车、起重机、燃料电池发电系统等一些小容量且需要功率快速交换的系统中得到广泛应用^[1-2]。

随着经济社会的发展,人类对电网电能的质量和可靠性要求越来越高,未来电网面临的一个重要问题是电网发电和电网负荷的不平衡^[3]。在当前的电网系统中,为了满足峰值负荷的需要,通常需要一些调峰电厂进行高峰负荷调节,而调峰电厂的成本高、利

用率低、性价比不高。可通过在用户负荷端加超级电容器储能系统对电网能量进行管理,解决供电系统存在的用电负荷和电能供应不平衡问题,在电网负荷低谷时对多余电能进行存储,在电网负荷高峰时将储能回馈给电网,以满足电网峰值负荷需要。这样既满足了电网峰值负荷的需要又充分利用电网低谷负荷时的电能,相对于应用于光伏发电系统和燃料电池系统中,超级电容器储能系统应用于电网中不仅起到能量缓冲,还起到缓冲电网负荷、提供短时供电等作用^[4]。

本研究首先对应用于电网系统中解决供电系统存在用电负荷和电能供应不平衡问题的超级电容器储能系统运行模式做介绍,对超级电容器储能系统运行于

收稿日期:2010-01-14

作者简介:马奎安(1985-),男,山东诸城人,主要从事逆变器数字控制、DC/DC 变流器数字控制方面的研究。E-mail: makuian@zju.edu.cn

通信联系人:陈 敏,男,副教授,硕士生导师。E-mail: heaven@zjuem.zju.edu.cn

充电储能模式时双向 DC/DC 变流器工作方式进行分析,并设计此时变流器的闭环控制参数,实现对超级电容器充电储能过程的控制。最后,搭建一个小容量的超级电容器储能系统,进行超级电容器充电储能实验,以验证超级电容器储能系统运行于充电储能模式时闭环控制设计的有效性。

1 超级电容储能系统运行模式分析

应用于电网中的超级电容储能系统的电路如图 1 所示,超级电容通过双向 DC/DC 变换器和并网变流器与电网连接,电网处于用电高峰时,并网变流器工作于逆变状态,向电网输送能量,双向 DC/DC 变换器工作于升压电路模式,维持并网逆变器的直流 Bus 电压恒定,此时超级电容处于放电释能状态;电网处于用电低谷时,并网变流器工作于整流状态,从电网吸收能量,并且维持直流 Bus 电压恒定,双向 DC/DC 变换器工作于降压电路模式,给超级电容器充电储能,使超级电容充电储能到预定值。

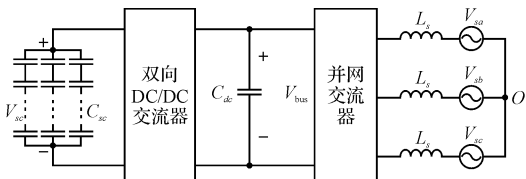


图 1 超级电容储能系统电路

本系统中双向 DC/DC 变换器选用半桥型非隔离式双向 DC/DC,其电路结构如图 2 所示。这种电路结构简单,采用的有源器件少,控制容易,效率较高,适用于电压变比不大、中小功率的情况,大功率应用时一般采用多重化结构。

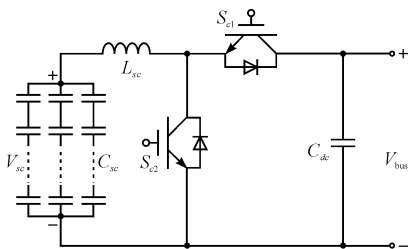


图 2 双向 DC/DC 变流器

下面对超级电容器储能系统充电工作模式时双向 DC/DC 变流器运行模式进行分析,并进行闭环控制设计。

2 充电工作模式时分析及控制设计

超级电容器充电工作模式时双向 DC/DC 变流器工作于降压电路模式,并网变流器工作于整流状态,等

效为一个直流电压源,根据文献[5],超级电容器组等效为一个理想电容器并联一个阻值较大的电阻 R_{ep} (并联等效阻抗)和串一个阻值较小电阻 R_{es} (等效串联阻抗)。超级电容器充电工作模式时的等效电路如图 3 所示,此时开关管 S_{c1} 工作在 PWM 状态,开关管 S_{c2} 工作于二极管状态。双向 DC/DC 电路等效于一个 Buck 电路。

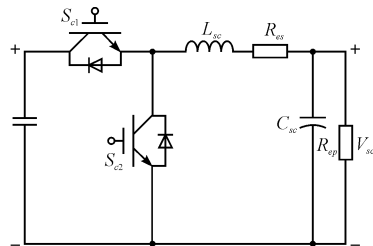


图 3 充电模式等效电路

超级电容器充电工作模式的控制框图如图 4 所示,为了限制超级电容器储能系统充电储能时的充电电流和实现对超级电容器组充电电流进行控制,充电时采用超级电容充电电流内环和充电电压瞬时值外环的双环控制。在图 4 中: K_1 为电感电流的采样系数;为了方便电感电流采样,电流采样后通过滤波器将其开关纹波滤掉,系统只采样电感电流的直流分量, $G_{lf}(s)$ 为电感电流滤波器的传递函数; $G_i(s)$ 为电流环控制器; K_2 为超级电容电压的采样系数; $G_v(s)$ 为电压瞬时值环控制器; $1/V_m$ 为 PWM 调节器的增益。从控制框图可以看出:当超级电容电压较低时,电压瞬时值环输出值饱和,限幅后作为电感电流的给定,此时超级电容处于恒流充电状态,当超级电容电压达到预定值时,电压瞬时值环起作用,此时处于恒压充电状态。

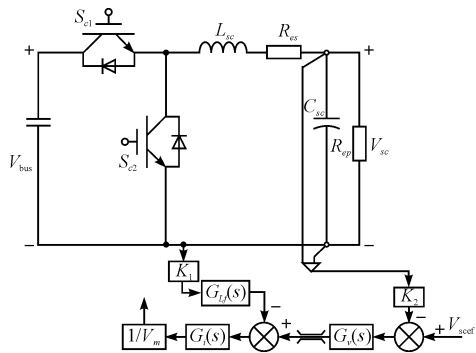


图 4 超级电容充电时的控制框图

这里采样电流滤波器采用美信公司生产的 MAX291 芯片来实现。根据文献[6]、文献[7]可知滤波器的传递函数 $G_{lf}(s)$ 如下:

$$G_{lf}(s) = \frac{\omega_c^8}{\prod_{i=1}^8 (s - \omega_c e^{j\frac{(7+2i)\pi}{16}})} \quad (1)$$

式中 ω_c —滤波器的截止角频率。

根据文献[8]可知,电流环的被控系统占空比到电感电流的传递函数 $G_{id}(s)$ 为:

$$G_{id}(s) = \frac{V_{bus}(R_{ep}C_{sc}s + 1)}{R_{ep}L_{sc}C_{sc}s^2 + (L_{sc} + R_{ep}R_{es}C_{sc})s + R_{ep} + R_{es}} \quad (2)$$

式中 V_{bus} —直流 Bus 电压; L_{sc} —储能电感; C_{sc} —超级电容器组等效电容; R_{es} —超级电容器组等效串联电阻; R_{ep} —超级电容器组等效并联电阻。

电流环控制器 $G_i(s)$ 采用 PI 调节器,即:

$$G_i(s) = \frac{K_{ii} + K_{ip}s}{s} \quad (3)$$

式中 K_{ii} —电流环的积分调节器; K_{ip} —电流环的比例调节器。

对超级电容充电时电压瞬时值环进行闭环控制^[9-10],电压瞬时值环的被控系统为 $G_{icl}(s) \times G_{vi}(s)$,其中电流环闭环传递函数为:

$$G_{icl}(s) = \frac{G_i(s)G_{id}(s) \times 1/V_m}{1 + G_i(s)G_{id}(s)G_{lf}(s) \times 1/V_m \times K_1} \quad (4)$$

超级电容电压到电感电流的传递函数为:

$$G_{vi}(s) = \frac{R_{ep}}{R_{ep}C_{sc}s + 1} \quad (5)$$

电压瞬时值环控制器 $G_v(s)$ 采用 PI 调节器:

$$G_v(s) = \frac{K_{vi} + K_{vp}s}{s} \quad (6)$$

式中 K_{vi} —电压瞬时值环的积分调节器; K_{vp} —电压瞬时值环的比例调节器。

本研究搭建了一个最大充放电功率为 2 kW,最大储能量为 60 kJ 的超级电容器储能系统,其中双向 DC/DC 变流器主电路参数为:

超级电容器组: $C_{sc} = 12.5$ F; 电感 $L_{sc} = 418$ μ H;

直流 Bus 电容: $C_{dc} = 750$ μ F, 直流 Bus 电压: $V_{dc} = 300$ V, 超级电容最高充电电压: $V_{scmax} = 100$ V。

超级电容组等效电路为: 一个电容值为 $C_{sc} = 12.5$ F 的理想电容器并联一个阻值为 10 k Ω 的电阻 R_{ep} 后串联一个阻值为 0.28 Ω 的电阻 R_{es} 。

设置开关管的开关频率为 $f_s = 20$ kHz, 电感电流滤波器的截止频率 $f_c = 5$ kHz, PWM 调制器的增益 $V_m = 1$, 电感电流采样系数 $K_1 = 1/25$, 超级电容电压采样系数 $K_2 = 1/300$ 。

由于电感电流采样的滤波器截止频率为 5 kHz, 系统设置电流环的 PI 调节器的转折频率为 80 Hz, 电流环的穿越频率为 800 Hz, 求得: 电流环 PI 调节器参数为: $K_{ip} = 0.176$, $K_{ii} = 88.349$ 。电流环补偿前后的

Bode 图如图 5 所示, 可见: 补偿后电流环的相位裕量为 45° , 增益裕量为 5.6 dB。

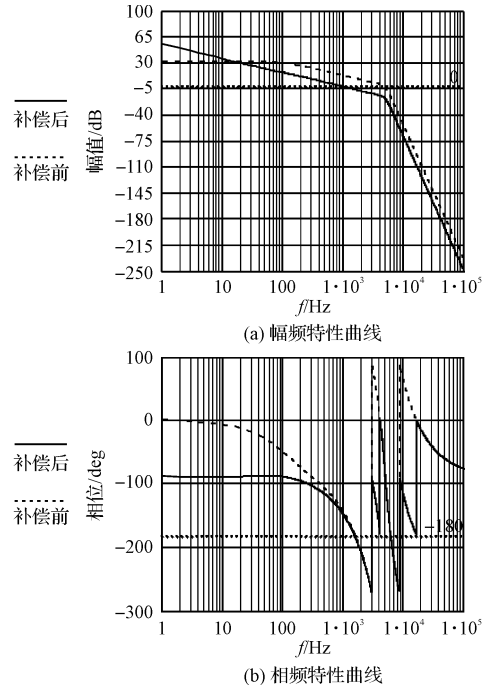


图5 电流环补偿前后的 Bode 图

在低频段, 电流环等效为一个比例环节, 电压瞬时值环等效为一个积分环节。根据被控系统的特性, 这里设计电压瞬时值环的穿越频率为 1 Hz, 取 PI 调节器的转折频率为 0.1 Hz。求得电压瞬时值环 PI 调节器参数为: $K_{ip} = 937.9$, $K_{vi} = 589.3$ 。电压瞬时值环补偿前后的 Bode 图如图 6 所示, 可见: 补偿后电压瞬时值环的相位裕量为 84° 。

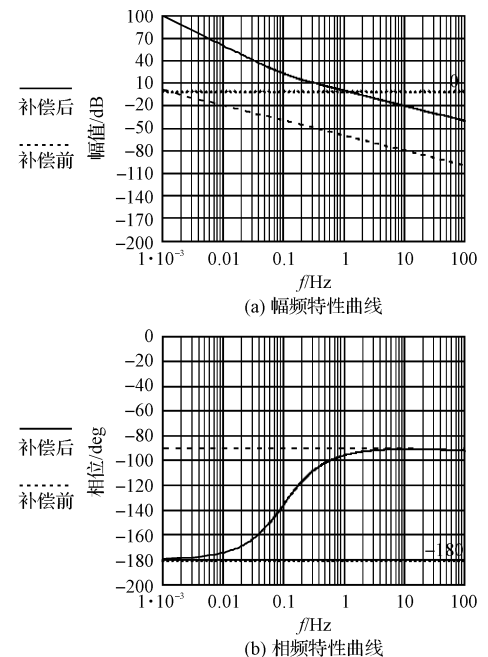


图6 电压瞬时值环补偿前后的 Bode 图

3 实验验证

本研究在双向 DC/DC 实验平台上对超级电容充电模式功能进行了验证,实验参数如下:直流母线电压 $V_{bus} = 300 \text{ V}$, 电感 $L_{sc} = 418 \text{ } \mu\text{H}$, 开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$, 巴特沃斯滤波器转折频率 $f_c = 5 \text{ kHz}$ 。超级电容器采用日本贵弥功公司生产的超级电容,其单台电容参数为:电容值 $C_F = 100 \text{ F}$, 内阻抗为 $R_e = 35 \text{ m}\Omega$, 最大充电电压为 $V_{max} = 15 \text{ V}$, 系统采用 8 台超级电容串联, 参数为: $C_{sc} = 12.5 \text{ F}$, 串联等效阻抗 $R_{esr} = 0.28 \text{ } \Omega$, 并联等效电阻 $R_p = 10 \text{ k}\Omega$ 。

实验中对超级电容组从零开始对其预充电到 75 V 。为了验证设计对超级电容器组的充电控制, 实验分别采用恒流充电电流为 10 A 和 20 A 的充电模式。超级电容器组充电电流为 10 A 时的充电电压电流波形如图 7 所示。超级电容器组充电电流为 20 A 时的充电电压电流波形如图 8 所示。其中, 超级电容器组的充电电流波形为经过巴特沃斯滤波器滤波后的波形。

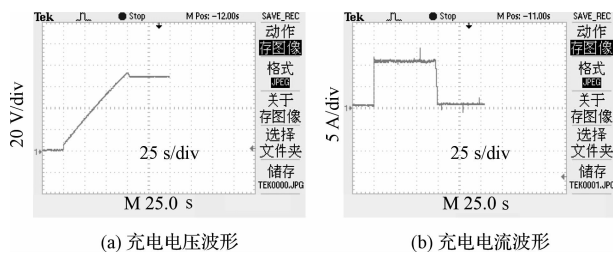


图 7 超级电容器组充电电流为 10 A 时的充电电压电流波形

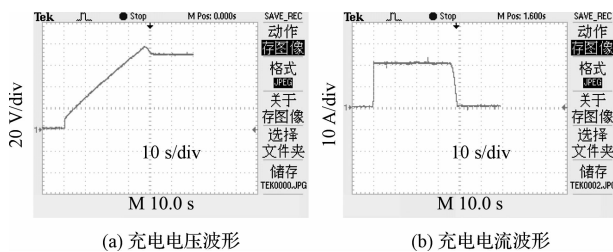


图 8 充电电流为 20 A 时的充电电压电流波形

从上面的实验波形可以看出, 超级电容器组电压较低时, 电压瞬时值环输出饱和, 不起作用, 超级电容器组以期望的电流进行恒流充电; 当超级电容器组电压达到预充电电压时, 电压瞬时值起作用, 超级电容器组转为恒压充电模式进行充电储能。由于系统的充电电流为人为设定, 储能系统可以按实际需要设定充电电流的大小。从图 7 可看出在超级电容器组充电的前 70 s , 由于超级电容器组的电压较低, 超级电容器组以设定的 10 A 电流进行恒流充电, 70 s 后, 由于超级电容器组充电到预定电压, 超级电容器组转入恒压充电

模式进行充电。图 8 与图 7 类似, 在充电的前 35 s 超级电容器组以设定的 20 A 电流进行恒流充电, 35 s 后, 超级电容器组转入恒压充电模式进行充电。

4 结束语

本研究对应用于解决供电系统电能供应和用电负荷不平衡问题的超级电容储能系统运行模式进行了分析, 并对超级电容器储能系统充电储能模式时的双向 DC/DC 变流器进行了闭环控制设计, 最后进行了实验, 设定了不同的恒流充电区充电电流值对超级电容器组进行充电储能。实验结果表明: 通过对应用于超级电容器储能系统中的双向 DC/DC 变流器闭环控制, 能够实现对超级电容器储能系统充电储能过程控制, 从而能够解决供电系统电能供应和用电负荷不平衡问题。

参考文献 (References):

- [1] LI Nan, ZHANG Jian-cheng, ZHONG Yun. A Novel Charging Control Scheme for Super-Capacitor Energy Storage in Photovoltaic Generation System [C]//Third International Conference on DRPT 2008. Nanjing: [s. n.], 2008: 2671 - 2675.
- [2] HUA Cheng-yong, MIERLO V, BOSSCHE V D, et al. Energy Sources Control and Management in Hybrid Electric Vehicles [C]//EPE-PEMC 2006. 12th International. Portoroz: [s. n.], 2006: 524 - 530.
- [3] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用 [J]. 电气应用, 2005, 24(4): 1 - 8.
- [4] 王 鑫, 郭佳欢, 谢清华, 等. 超级电容器在微电网中的应用 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(6): 18 - 22.
- [5] NELMS R M, CAHELA D R, NEWSOM R L, et al. A Comparison of Two Equivalent Circuits for Double-layer Capacitors [C]//APEC 99. Fourteenth Annual Volume 2. Dallas: [s. n.], 1999: 692 - 698.
- [6] 冯乙引. 开关电容滤波器 MAX291/292/295/296 的特性与应用 [J]. 集成电路应用, 1996(5): 18 - 20.
- [7] 祁才君. 数字信号处理技术算法分析与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [8] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [9] 张慧妍. 超级电容器直流储能系统分析与控制技术研究 [D]. 北京: 中科院电工所, 2006.
- [10] 朱选才. 燃料电池发电系统功率变换及能量管理 [D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2009.

[编辑: 李 辉]