

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.02.005

蓄电池-超级电容混合储能双重解耦控制策略

贾春燕¹, 康 朋¹, 彭光金², 余海威³, 陈永刚¹, 刘 瑜¹, 朱 熠²

(1. 重庆市电力公司 经济技术研究院, 重庆 401120; 2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与
新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610041)

摘要: 蓄电池-超级电容器混合储能系统既可充分应用功率型储能器件的物理特性, 又可优化蓄电池的充放电过程, 是储能技术未来发展方向之一。本研究中提出了一种主从结构双重解耦控制策略, 利用功率前馈解除了母线电压与扰动输入间的耦合关系, 也抑制了耦合扰动输入对超级电容端电压的影响, 将端电压有效维持在一定范围, 解决了传统控制策略下超级电容的过充过放问题, 简化了控制过程; 而且在保证微电网稳定运行的同时, 使得蓄电池的充放电电流变化平滑, 降低其变化率, 延长其使用寿命, 并提高了微电网孤岛运行储能系统运行的可靠性。最后通过仿真分析, 验证了所提控制策略的正确性。

关键词: 微电网; 孤岛运行; 混合储能; 解耦控制

中图分类号: TM912.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)02-042-09

Dual decoupling control strategy of battery-supercapacitor hybrid energy storage

JIA Chunyan¹, KANG Peng¹, PENG Guangjin², YU Haiwei³, CHENG Yonggang¹,
LIU Yu¹, ZHU Yi²

(1. Economic and Technological Research Institute of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 40120, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
3. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Chengdu 640041, P. R. China)

Abstract: The battery and supercapacitor hybrid energy storage system can not only fully utilize the physical characteristics of power-type energy storage devices, but also optimize the charging and discharging process of batteries, and it is one of the development trends of energy storage technology in the future. A dual decoupling control strategy with master-slave structure is proposed to meet the requirements in isolated operation of microgrid. The coupling relationship between bus voltage and disturbance input is eliminated by power feedforward, and the influence of coupling disturbance input on the terminal voltage of supercapacitor is restrained, thus allowing the terminal voltage to be effectively maintained in a norm. The problem of supercapacitor overcharge and overdischarge under the traditional control strategy is solved, and

收稿日期: 2019-09-25

作者简介: 贾春燕(1989—)女, 硕士研究生, 主要从事电网工程技术经济评审、项目后评价等工作, (E-mail)381457563@qq.com。

通讯作者: 彭光金, 男, 博士, 讲师, 主要从事数字化与优化技术在电力工程管理中的应用研究, (E-mail)pengguangjin@cqu.edu.cn。

the control process is simplified. The stable operation of the microgrid is ensured, the charging and discharging current of the batteries changes smoothly, the change rate of the output current of the batteries decreases, and the service life of the batteries is prolonged. The reliability of the micro-grid island operation energy storage system is improved. Finally, simulation analysis is carried out and the correctness of the proposed control strategy is verified.

Keywords: microgrid; isolated island operation; hybrid energy storage; decoupling control

微电网是近年来高速发展的综合性电力系统,可促进电网对可再生能源的消纳,将提供给网侧的能源多类型化。依据不同的运行状态,微电网存在并网和孤岛这两种不同的模式^[1-2],当微网的并网条件不匹配时,将由并网过渡到孤岛状态^[3]。

储能技术在微电网消纳可再生能源过程中有着重要作用,可破解目前电力“即发即用”的同步性问题,同时也可以对新能源的输出功率波动进行补偿^[4-5]。

蓄电池-超级电容器混合储能既能够充分应用超级电容功率型储能器件的物理特性、又可优化蓄电池能量型储能器件的充放电过程,延长蓄电池使用寿命,得到了业界的普遍关注^[6]。

混合储能系统控制策略的核心在于平抑母线的功率波动,并且在功率型储能器件和能量型储能器件间进行合理的功率分配。文献[7]采用自适应小波包分解和模糊优化控制对母线的电压波动进行二次功率分配,优化储能系统的荷电状态变化过程。文献[8]提出一种基于移动平均滤波算法的自适应能量控制策略,有效解决了脉动负荷功率在蓄电池和超级电容间的功率分配问题。文献[9]利用高通、带通和低通滤波器等3个隐形滤波器分离不同频的波动功率,达到控制效果。上述文献的控制策略并未考虑超级电容的容量大小,在平抑功率波动时若超级电容的剩余容量超过了阈值,会导致系统不能达到控制目标。在此基础上,文献[10]提出了一种主从结构式自适应控制策略,并利用功率前馈解除了母线电压与扰动输入间的耦合关系,在延长蓄电池使用寿命的同时也将超级电容器的端电压有效维持在一个范围。但是该控制策略并不能抑制耦合扰动输入对超级电容端电压的影响,使得控制效果大打折扣。基于此,我们分析了互补 PWM(pulse width modulation)导通控制方法在混合储能中的优势,并对其进行小信号建模,提出了一种双重解耦控制方案,通过仿真研究验证了所提控制策略的正确性。

1 系统模型建立

1.1 系统状态结构

如图 1^[11]所示,微电网孤岛状态下包含电源、储能和负载 3 个部分,它们分别通过对应的控制器与母线相连。

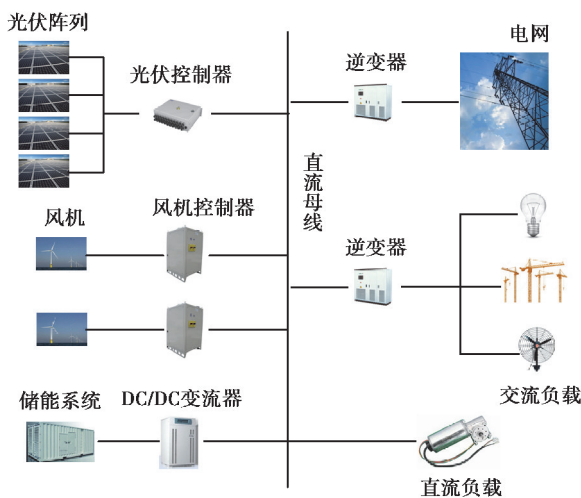


图 1 微电网拓扑结构^[11]

Fig. 1 Micro grid topology^[11]

双向 DC/DC 变换器在储能器件和母线间起着连接桥梁的作用,可降低母线的电压波动,控制储能器件的充放电过程,同时也可降低储能器件的容量配置^[12]。在进行分析时,通常用可控电流源 i_m 等效替代储能系统的外部扰动输入^[13],如图 2 所示。

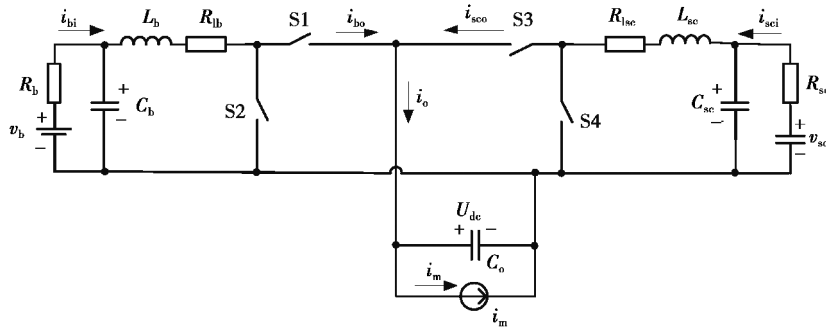


图 2 系统等效电路

Fig. 2 The equivalent circuit

1.2 系统建模

双向 DC/DC 变换器具有成本低和工作效率较高的特点^[14],可降低系统的重量和体积。互补导通模式可使变换器的开关损耗降至零,达到软开关的效果,且响应速度更快^[15]。在微电网中,瞬时冲击较多,频繁的功率流向切换可导致较大的开关损耗,因此采用互补 PWM 导通模式更为适合。

对图 2 所示的电路进行小信号建模,可以得到下列状态空间表达式^[11]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta} i_{bi} \\ \dot{\Delta} i_{sci} \\ \dot{\Delta} v_{bus} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_{lb} + R_b}{L_b} & 0 & -\frac{(1-D_1)}{L_b} \\ 0 & -\frac{R_{lsc} + R_{sc}}{L_{sc}} & -\frac{(1-D_2)}{L_{sc}} \\ \frac{1-D_1}{C_o} & \frac{1-D_2}{C_o} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta i_{bi} \\ \Delta i_{sci} \\ \Delta v_{bus} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_{bus}}{L_b} & 0 \\ 0 & \frac{V_{bus}}{L_{sc}} \\ -\frac{I_b}{C_o} & -\frac{I_{sc}}{C_o} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_b} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sc}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_o} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v_b \\ \Delta v_{sc} \\ \Delta i_m \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: L_b 、 L_{sc} 分别为蓄电池和超级电容端变换器的电感; R_{lb} 、 R_{lsc} 分别为 L_b 、 L_{sc} 的内阻; v_{bus} 为母线电压; i_{bi} 、 i_{sci} 分别为储能系统的输出电流; v_b 、 v_{sc} 分别为 2 个储能端变换器的端电压; d_1 、 d_2 分别为开关 S2、S4 的占空比; D_1 、 D_2 分别为开关 S2、S4 的稳态占空比; \hat{d}_1 、 \hat{d}_2 分别为开关 S2、S4 在稳态工作点附近的小扰动量; C_o 为输出稳压电容值; \hat{v}_b 、 \hat{v}_{bus} 、 \hat{v}_{sc} 分别为蓄电池电压、母线电压、超级电容电压在稳态工作点附近的小扰动量; \hat{i}_{sci} 、 \hat{i}_{bi} 、 \hat{i}_m 分别为超级电容电流、蓄电池电流、等效扰动电流在稳态工作点附近的小扰动量; $\dot{\hat{v}}_{bus}$ 、 $\dot{\hat{i}}_{sci}$ 、 $\dot{\hat{i}}_{bi}$ 分别为母线电压扰动量、超级电容电流扰动量、蓄电池电流扰动量的一阶微分; R_{sc} 、 R_b 分别为开关超级电容和蓄电池的内阻。

根据上述模型,可分别求出 i_{sci} 对 d_2 和 i_{bi} 对 d_1 的传递函数为^[11]:

$$G_{iscd2}(s) = \frac{\dot{\Delta} i_{sc}}{\Delta d_2} = \frac{\left(s + \frac{R_{lb} + R_b}{L_b}\right) \left[\left(\frac{1-D_2}{L_{sc}}\right) \left(-\frac{I_{sc}}{C_o}\right) - \frac{V_{bus}}{L_{sc}} s \right] + \frac{V_{bus}}{L_{sc}} \left(\frac{1-D_1}{L_b}\right) \left(-\frac{1-D_1}{C_o}\right)}{-\left(s + \frac{R_{lb} + R_b}{L_b}\right) \left[s \left(s + \frac{R_{lsc} + R_{sc}}{L_{sc}}\right) + \frac{(1-D_2)^2}{C_o L_{sc}} \right] - \frac{(1-D_1)^2}{L_b C_o} \left(s + \frac{R_{lsc} + R_{sc}}{L_{sc}}\right)}, \quad (2)$$

$$G_{ibd1}(s) = \frac{i_b}{d_1} = \frac{\left(s + \frac{R_{lsc} + R_{sc}}{L_{sc}}\right) \left[\left(\frac{1 - D_1}{L_b}\right) \left(-\frac{I_b}{C_o}\right) - \frac{V_{bus}}{L_b} s\right] + \frac{V_{bus}}{L_b} \left(\frac{1 - D_2}{L_{sc}}\right) \left(-\frac{1 - D_2}{C_o}\right)}{-\left(s + \frac{R_{lb} + R_b}{L_b}\right) \left[s \left(s + \frac{R_{lsc} + R_{sc}}{L_{sc}}\right) + \frac{(1 - D_2)^2}{C_o L_{sc}}\right] - \frac{(1 - D_1)^2}{L_b C_o} \left(s + \frac{R_{lsc} + R_{sc}}{L_{sc}}\right)}. \quad (3)$$

式中: G_{ibd1} 、 G_{iscd2} 分别为蓄电池电流对开关 S2 的传递函数、超级电容电流对开关 S4 的传递函数; V_{bus} 为母线电压稳态值。

2 混合储能双重解耦控制策略

在孤岛状态下母线电压稳定、蓄电池充放电电流平滑及超级电容的能量密度小是该系统控制策略所要达到的目标。

2.1 主从结构双重解耦控制策略

鉴于蓄电池与超级电容的性能互补特性,我们提出一种双重解耦控制策略,如图 3 所示。

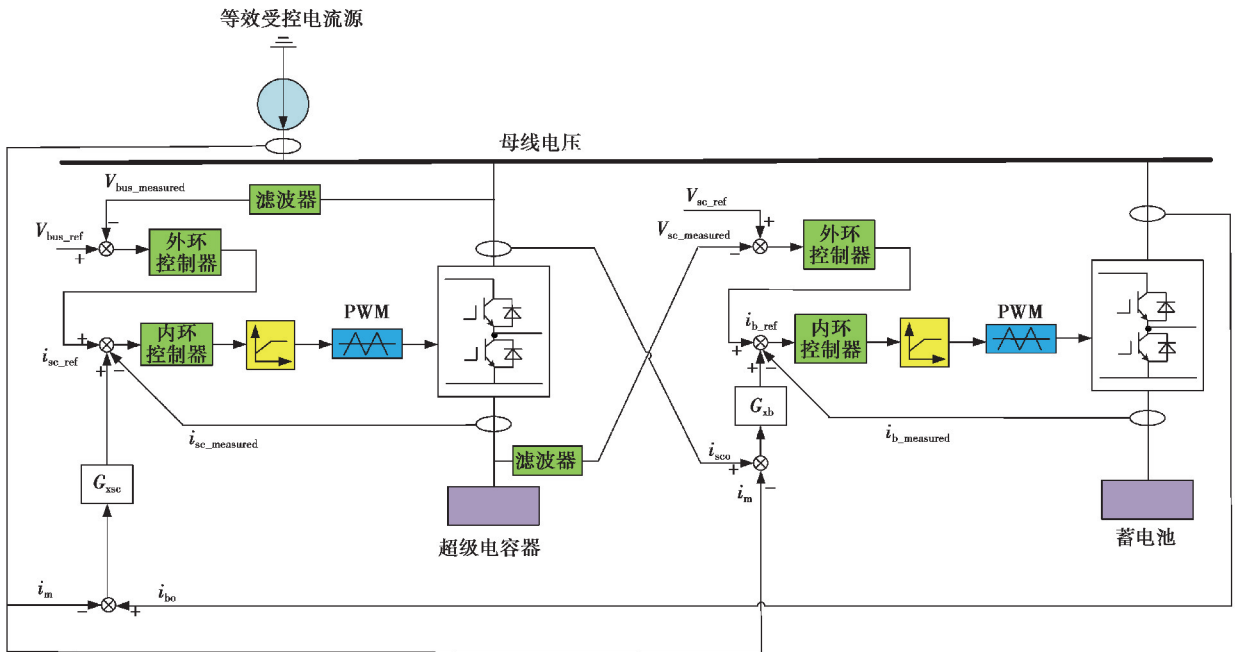


图 3 双重解耦控制策略框图

Fig. 3 Diagram of control strategy

超级电容的控制环路维持母线电压的稳定,在电流内环中引入扰动前馈量,将扰动变化对系统的影响考虑在控制内并予以反馈。考虑到超级电容的容量,所提控制策略利用蓄电池的控制环路将超级电容的端电压维持在一定的设定值附近,使超级电容不会过充过放,同时也将扰动变化对其影响考虑在控制内环并用前馈控制予以反馈。

2.2 前馈项解耦系数推导

双重解耦控制策略中前馈环解除了固有输入与扰动输入间的耦合关系,提高两个控制环路的独立性,同时也消除了扰动对控制目标的影响,使得系统对扰动干扰的抵抗力进一步提高。

对所提策略进行动态分析,由图 4(a)可以推导出母线电压与参考电压输入和扰动电流输入的表达式:

$$U_{bus} = T_{ref} U_{bus-ref} + Z_o (-i_m + i_{bo}), \quad (4)$$

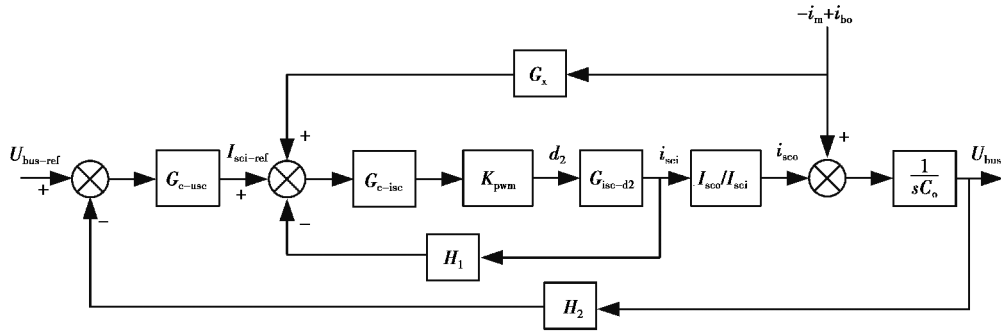
其中

$$T_{ref} = \frac{G_{c-usc} G_{c-isc} K_{pwm} G_{isc-d2} I_{sco}}{\Delta} \frac{1}{I_{sci} s C_o}, \quad (5)$$

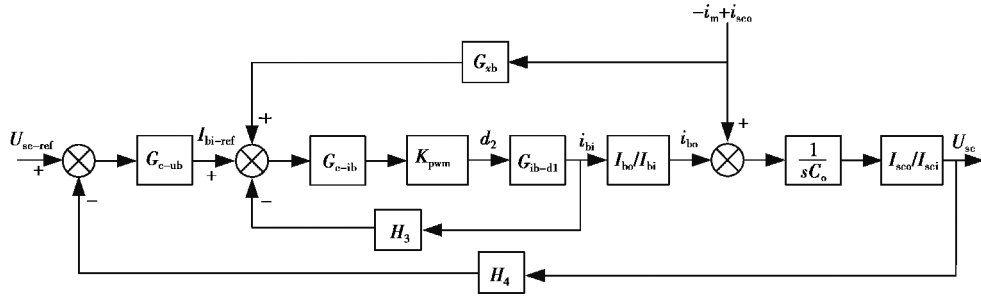
$$Z_o = \frac{1 + G_{c-isc} K_{pwm} G_{isc-d2} H_1 + G_{c-isc} K_{pwm} G_{isc-d2} \frac{I_{sco}}{I_{sci}} G_x}{\Delta} \frac{1}{sC_o}, \quad (6)$$

$$\Delta = 1 + G_{c-isc} K_{pwm} G_{isc-d2} H_1 + G_{c-usc} G_{c-isc} K_{pwm} G_{isc-d2} \frac{I_{sco}}{I_{sci}} H_2. \quad (7)$$

式中: T_{ref} 为电压系数, Z_o 为扰动阻抗, $U_{bus-ref}$ 为母线电压参考值, G_{c-usc} 为超级电容端电压外环的控制器传递函数, G_{c-isc} 为超级电容端电流内环的控制器传递函数, K_{pwm} 为比例系数, I_{sco} 为超级电容端稳态输出电流, I_{sci} 为超级电容端稳态输入电流, H_1 为超级电容端控制内环反馈通道系数, H_2 为超级电容端控制外环反馈通道系数。



(a) 超级电容端控制框图



(b) 蓄电池端控制框图

图 4 控制系统动态结构图

Fig. 4 Dynamic structure diagram of control system

由式(4)可知,由于存在扰动阻抗 Z_o ,扰动电流将导致母线电压波动。若存在前馈项系数 G_x 使得 Z_o 在理论上达到 0,可使扰动电流对于母线电压的影响消失。令 $Z_o=0$,可以得到:

$$G_x = -\frac{1 + G_{c-isc} K_{pwm} G_{isc-d2} H_1 \frac{I_{sci}}{I_{sco}}}{G_{c-isc} K_{pwm} G_{isc-d2}}, \quad (8)$$

$$U_{bus} = T_{ref} U_{bus-ref}, \quad (9)$$

即直流母线电压理论上完全不再受扰动电流突变及耦合电流的影响,暂态时母线电压仍保持稳定。

同理可以推导出蓄电池端控制环路的前馈项系数 G_{xb} 的表达式为:

$$G_{xb} = \frac{1 + G_{c-ib} K_{pwm} G_{ib-d1} H_3 \frac{I_{bi}}{I_{bo}}}{G_{c-ib} K_{pwm} G_{ib-d1}}, \quad (10)$$

式中: G_{c-ub} 为蓄电池端电压外环的控制器传递函数, G_{c-ib} 为蓄电池端电流内环的控制器传递函数, I_{bo} 为蓄电池端稳态输出电流, I_{bi} 为蓄电池端稳态输入电流, H_3 为蓄电池端控制内环反馈通道系数, H_4 为蓄电池端控制外环反馈通道系数。

超级电容电压理论上完全不再受扰动电流突变及耦合电流的影响,暂态时超级电容电压仍保持稳定。

2.3 混合储能系统功率分配

系统截止频率越高,响应速度就会越快,而开环和闭环截止频率存在正相关的联系,因此系统的反应速度可用开环截止频率来表征^[16]。根据 2.2 节所述,在我们提出的双重解耦控制结构中存在 4 个主回路闭环,若区别设置 4 个环路的开环频率,可使得波动功率的高低频分量自动隔离。

将蓄电池和超级电容的外环控制器开环频率区别设置,二者对于波动功率的响应速度也会明显不同。当外部环境变化导致储能系统功率缺额出现波动时,由超级电容器优先响应以弥补缺额,在此过程中其端电压亦会发生改变。根据蓄电池控制环路的目标,在超级电容端电压波动后,蓄电池会缓慢反应,利用自身蓄能为超级电容进行充放电操作,将超级电容的剩余电量在动态平衡保持稳定。在这个动态过程中,超级电容响应快,补偿高频功率波动;而蓄电池响应缓慢,补偿低频功率波动,降低蓄电池端电流变化率,延长其使用寿命。在整个平抑功率波动的过程中,并不影响母线电压的稳定。

3 仿真研究

采用 Matlab/Simulink 对所提控制策略进行仿真验证。系统框图如图 4 所示,电路参数见表 1,与文献 [10]保持一致,开关频率 50 kHz,超级电容电流内环、电压外环的开环截止频率设置为 5 kHz 和 500 Hz,蓄电池电流内环、电压外环的开环截止频率分别设置为 5 kHz 和 5 Hz。负载扰动用阶跃突变的极端情况来模拟。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数及符号	参数值	参数及符号	参数值
C_o	2 000 μF	C	17 F
R_{lb}	0.5 Ω	R_{lsc}	0.5 Ω
C_b	50 μF	C_{sc}	50 μF
L_b	100 μH	L_{sc}	100 μH
V_{bat}	30 V	V_{sc}	30 V
V_{bus}	100 V	i_m	0.4 A

3.1 充电状态

如图 5 所示,负载在 1.000 s 发生突变,储能系统的充电电流阶跃性变大,当负载电流从 0.4 A 跳变为 0.8 A 时,蓄电池和超级电容的充电电流都处于增大状态,但后者的电流变化率明显比前者高,系统在 0.025 s 内即恢复到稳态,证明超级电容承担了系统的瞬时冲击功率,而蓄电池对长时功率波动缺额进行了弥补。双重解耦控制策略使得高频和低频波动功率在两种储能装置内得到有效分配并补偿,同时蓄电池的充电电流平稳增大,变化率较小。

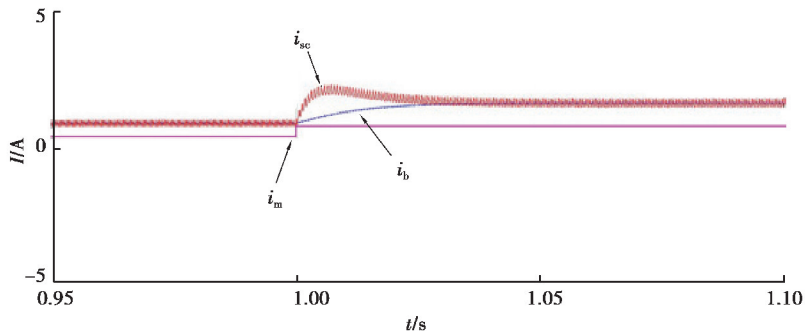


图 5 1.000 s 时电流瞬态响应波形图

Fig. 5 Current response waveforms at 1.000 s

图 6 为负载在 1.000 s 发生突变时直流母线电压瞬态响应的波形图,当负载电流变化时,母线电压依然保持稳定,基本没有波动,电压波动率小于 0.1%,双重解耦控制策略可有效抑制母线的功率波动。

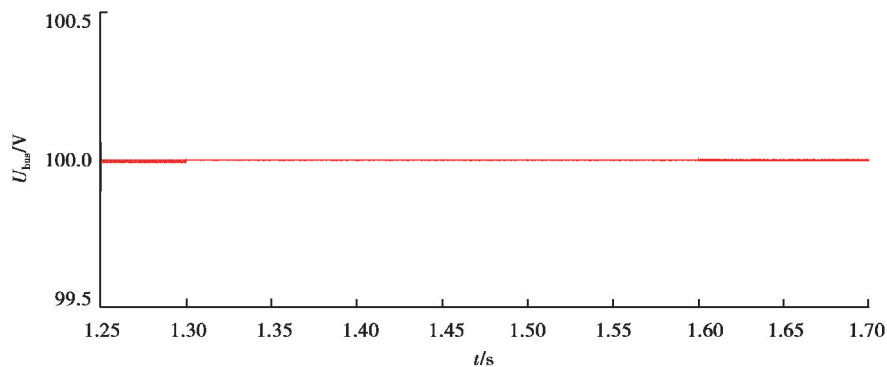


图 6 负载突变时直流母线电压瞬时响应波形图

Fig. 6 DC-bus voltage response waveform

3.2 充电至放电状态

图 7 为负载在 1.30 s 和 1.60 s 相继发生突变时,超级电容和蓄电池电流瞬态响应的波形图。

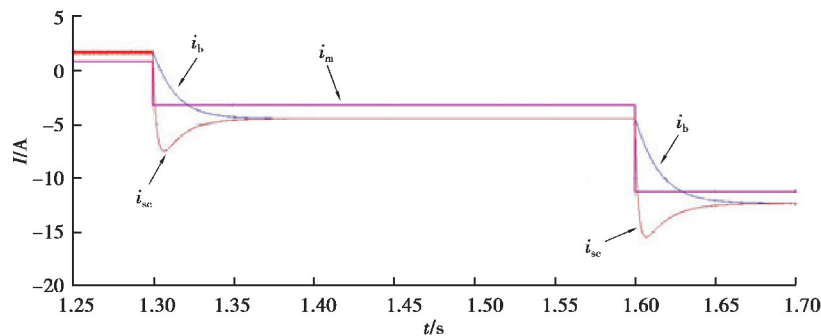


图 7 负载突变时电流波形图

Fig. 7 Current response waveforms when the load changes

在 1.30 s 时刻,负载电流从 0.8 A 跳变为 -3.2 A 时,蓄电池和超级电容的充电电流都有所减小,但超级电容承担了系统的瞬时冲击功率,电流变化率较为明显,而蓄电池电流变化较为缓慢。在 1.60 s 时刻,负载电流从 -3.2 A 跳变为 -11.6 A 时,储能系统由充电状态转变为放电状态,蓄电池和超级电容的电流也都由正转负,此时超级电容的电流变化率依然较高,蓄电池的充电电流缓慢变化,系统在 0.05 s 内即恢复到稳态。

证明超级电容承担了系统的瞬时冲击功率,而蓄电池对长时功率波动缺额进行了弥补。

图 8 为负载在 1.30 s 和 1.60 s 相继发生突变时直流母线电压瞬态响应的波形图。在负载变化时,系统由充电状态转为放电状态,母线电压始终维持在 100 V,电压波动率很小,证明所提控制策略对母线功率波动存在很强的抑制效果。

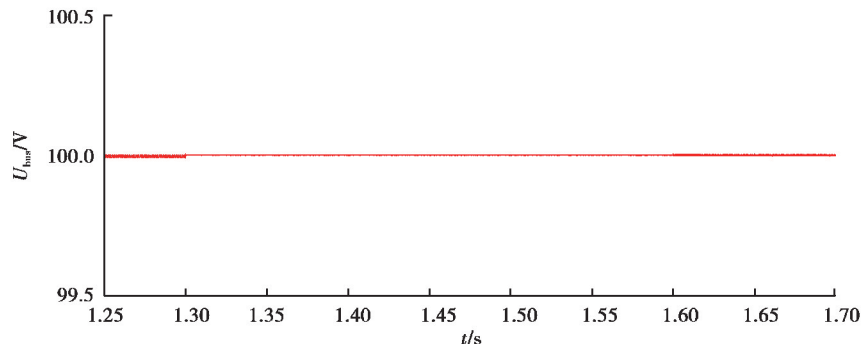


图 8 超级电容器端电压波形图

Fig. 8 Terminal voltage waveform of supercapacitor

4 总 结

针对微电网孤岛运行状态下对混合储能系统的要求,提出一种主从结构双重解耦控制策略,利用功率前馈解除了母线电压与扰动输入间的耦合关系,也抑制了耦合扰动输入对超级电容端电压的影响,将其端电压有效维持在一个范围内,解决了传统控制策略下超级电容的过充过放问题,使蓄电池的充放电电流变化平滑,降低其变化率,延长了使用寿命。最后,仿真研究验证了所提控制策略的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 邱麟,许烈,郑泽东,等. 微电网运行模式平滑切换的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 171-176.
QIU Lin, XU Lie, ZHENG Zedong, et al. Control method of microgrid seamless switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 171-176. (in Chinese)
- [2] 毕晓辉,孙韬,毛瑞,等. 光储微电网混合储能系统的控制策略及开关优化[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(6): 11-18.
BI Xiaohui, SUN Tao, MAO Rui, et al. Control strategy and protection switch optimization of hybrid energy storage system for PV-storage microgrid system[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(6): 11-18. (in Chinese)
- [3] Lu M S, Chang C L, Lee W J, et al. Combining the wind power generation system with energy storage equipment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(6): 2109-2115.
- [4] Cipcigan L M, Taylor P C. Investigation of the reverse power flow requirements of high penetrations of small-scale embedded generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(3): 160.
- [5] Yao L Z, Yang B, Cui H F, et al. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 519-528.
- [6] Zhou H H, Bhattacharya T, Tran D, et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 923-930
- [7] 吴杰,丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 7-12. (in Chinese)
- [8] 田明杰,吴俊勇,郝亮亮,等. 基于多端口 DC/DC 变换器的混合储能系统自适应能量控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3378-3385.
TIAN Mingjie, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Adaptive energy control strategy for hybrid energy storage system based on multiport DC/DC converters[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3378-3385. (in Chinese)

- WANG Ze, YANG Honggeng, WANG Jiaying, et al. Rapid low-frequency interharmonic detection with negative-frequency elimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 140-145, 156. (in Chinese)
- [11] 李醒飞, 李立, 寇科, 等. 全相位 FFT 时移相位差频谱校正分析及改进[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(12): 1290-1295.
- LI Xingfei, LI Li, KOU Ke, et al. Analysis and improvement of time-shift phase difference spectral correction based on all-phase FFT[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(12): 1290-1295. (in Chinese)
- [12] Chen K F, Cao X, Li Y F. Sine wave fitting to short records initialized with the frequency retrieved from Hanning windowed FFT spectrum[J]. Measurement, 2009, 42(1): 127-135.
- [13] Borkowski J, Kania D, Mroczka J. Interpolated-DFT-based fast and accurate frequency estimation for the control of power[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 7026-7034.
- [14] Wang Y, Wei W, Xiang J. Multipoint interpolated DFT for sine waves in short records with DC components[J]. Signal Processing, 2017, 131: 161-170.
- [15] Luo J F, Hou S C, Li X Y, et al. Generalization of interpolation DFT algorithms and frequency estimators with high image component interference rejection[J/OL]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016, 2016: 30 (2016-03-05) [2019-07-25]. <https://link.springer.xilesou.top/content/pdf/10.1186%2Fs13634-016-0330-6.pdf>. DOI: 10.1186/s13634-016-0330-6.
- [16] Zhou W, Gan L Q, Xiao H, et al. Frequency estimators with high resistance to interference from image frequency components[J]. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2018, 12(2): 147-158.
- [17] Handel P. Properties of the IEEE-STD-1057 four-parameter sine wave fit algorithm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(6): 1189-1193.

(编辑 罗 敏)

(上接第 49 页)

- [9] 李武华, 徐驰, 禹红斌, 等. 直流微网系统中混合储能分频协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 84-92.
- LI Wuhua, XU Chi, YU Hongbin, et al. Frequency dividing coordinated control strategy for hybrid energy storage system of DC micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 84-92. (in Chinese)
- [10] 侯世英, 余海威, 李琦, 等. 微电网孤岛运行混合储能自适应控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 15-21.
- HOU Shiying, YU Haiwei, LI Qi, et al. Adaptive control strategy of hybrid energy storage in microgrid islanded operation state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 15-21. (in Chinese)
- [11] 余海威. 微电网孤岛运行混合储能系统控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- YU Haiwei. Research on control strategy of hybrid energy storage system in microgrid islanded operation state[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [12] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容_蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.
- SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6. (in Chinese)
- [13] Kuperman A, Aharon I, Malki S, et al. Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2): 806-815.
- [14] 张方华, 朱成花, 严仰光, 等. 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, et al. The controlled model of bi-directional DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 46-49. (in Chinese)
- [15] 张国驹, 唐西胜, 周龙, 等. 基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
- ZHANG Guojun, TANG Xisheng, ZHOU Long, et al. Research on complementary PWM controlled buck/boost bi-directional converter in supercapacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21. (in Chinese)
- [16] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2007: 226.
- HU Shousong. Principles of automatic control [M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2007: 226. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)