

混合储能系统功率自主分频控制方法

陈燕东[†], 谭文娟, 周小平, 周乐明, 杨苓, 伍文华

(湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对分布式电源出力间歇性与负载多变性的问题,储能成为直流微电网电压支撑与改善电能质量的重要途径.为了充分利用混合储能系统的优势,实现功率的合理分配,提出了一种适用于混合储能系统的功率自主分频控制方法,该方法通过在各储能单元下垂控制环中引入虚拟阻抗或虚拟电容,重塑各变换器的等效输出阻抗值,从而实现了超级电容和蓄电池的优势互补.在负荷突变时,超级电容能快速吸收系统功率波动的高频部分,提高系统的动态响应;蓄电池则主要用来平衡系统功率波动的低频部分,延长蓄电池的使用寿命,从而保证系统稳定可靠运行.仿真验证了所提方法的正确性.

关键词:直流微电网;储能系统;自主分频控制;虚拟阻抗;下垂控制

中图分类号:TM910

文献标志码:A

An Autonomous-frequency-split Power Control Method for Hybrid Energy Storage System

CHEN Yandong[†], TAN Wenjuan, ZHOU Xiaoping, ZHOU Leming, YANG Ling, WU Wenhua

(National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center,

Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In view of the intermittent distributed power output and load variability, energy storage becomes an important way to support DC microgrid voltage and improve power quality. In order to make full use of the advantages of hybrid energy storage to achieve reasonable power distribution, an autonomous-frequency-split power control strategy for hybrid energy storage is proposed. In this method, the equivalent output impedance of converters is reshaped by introducing the virtual impedance or virtual capacitor in the droop control. By this way, the advantages of supercapacitor and battery can be integrated. At the load mutation, supercapacitor rapidly absorbs the high-frequency component of power fluctuation to improve the dynamic respond speed. Meanwhile, battery is mainly used to balance the low-frequency power in order to extend the service life and ensure the reliable operation of system. The simulation verifies the correctness of the proposed method.

Key words: DC microgrid; energy storage system; autonomous-frequency-split control; virtual impedance; droop control

* 收稿日期:2018-05-15

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51577056), National Natural Science Foundation of China(51577056); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2028), Hunan Provincial Natural Science Foundation of China(2017JJ2028); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015-001), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015-001)

作者简介:陈燕东(1979—), 男, 湖南澧县人, 湖南大学副教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: yandong_chen@hnu.edu.cn

随着微电网技术的发展,发展太阳能、风能等分布式可再生能源成为解决能源危机和环境污染的有效途径^[1-3]。微电网作为将分布式电源、储能系统及电力负荷整合到可控子网络的核心,已成为未来智能配用电系统的重要组成部分。依据各单元所连接母线的性质可将微电网分为交流微电网和直流微电网两类。与交流微电网相比,直流微电网具有结构简单、能量转换次数少,效率高等优势,且无需考虑频率偏移、相位同步和无功补偿等问题,推动了直流微电网的迅速发展^[4]。

考虑到分布式发电装置功率输出的间歇性和不确定性,采用储能装置平抑系统的功率波动,使用户获得稳定、可靠、高质的电能^[5-7]。但是单一的储能设备由于工作特性的原因使其使用范围受限,如超级电容虽功率密度大且能够快速响应系统波动,但却不适用于大容量储能;蓄电池虽然能量密度大、适用于大容量储能,但其响应速度慢且寿命较短。为了充分发挥两者的优势,混合储能系统应运而生,在负荷突变时混合储能系统能及时进行削峰填谷,保证了直流微电网系统供电的可靠性^[8-12]。而如何充分利用混合储能系统的优势,实现合理的功率调配,降低系统的运行成本,延长储能元件的使用寿命成为混合储能控制系统应用中亟需解决的问题。

文献[13]提出了一种新型模型预测控制器和动态规划算法,根据总功率请求和超级电容器的充电状态来决定功率分配,削弱了蓄电池电流的峰值,延长了其使用寿命。文献[14]利用小波包解耦了系统功率波动高频和中频分量并采用模糊控制对混合储能功率输出进行修正,在一定程度上平抑了电源功率输出的间歇性并维持了微电网内供需的实时平衡。文献[15-16]提出了将系统不平衡功率经高通或者低通滤波器进行滤波,提取出高频功率波动和低频功率波动分量,作为超级电容储能和蓄电池储能需输出功率的参考,实现了混合储能各单元对系统功率波动的最优分配。然而上述控制方法严重依赖于集中控制器为本地单元提供的功率参考值,且对系统的净功率测量精度要求较高,一旦通信系统发生延时或者故障,会影响系统的安全稳定运行,严重时可能导致整个系统的停运^[17-18]。

为提高系统运行的可靠性,各微源和储能装置采用下垂控制,根据直流母线电压信号调整出力以实现不同变换器间的功率均分^[19-20]。文献[21]提出了一种多滞环调节方法,依据母线电压的变化对蓄电

池充放电的电流大小进行优化控制,提高了储能设备运行效率,但蓄电池在各段切换点电流并没有进行平滑转换。文献[22-23]基于超级电容和电池的下垂特性,对直流母线电压的波动范围进行分段响应,实现储能设备工作方式的平滑切换。该方法可自动调整超级电容和电池的出力值,维持系统功率平衡,然而它着重于实现系统稳态时的功率均分,并没有对各储能设备的动态的频率响应控制进行分析。文献[24]提出一种自主分频虚拟阻抗控制策略,通过对变换器等效输出阻抗进行适当的频域变换,使超级电容和电池分别响应功率波动的高频分量和低频分量,但电压外环所采用的比例控制在系统稳态时会存在静态误差,超级电容仍需要提供部分电流去维持系统功率平衡。

为此,本文针对直流微电网中的混合储能系统提出了一种适用于混合储能系统的功率自主分频控制方法。该方法通过在各储能单元的下垂控制中引入虚拟阻感或虚拟电容控制环,从而改变了各变换器的等效输出阻抗,使超级电容和蓄电池在负荷突变时能进行分频响应,提高了系统的动态特性,延长了储能单元的使用寿命,实现了功率的合理分配。

1 直流微电网系统

1.1 直流微电网结构

直流微电网主要由微源、电力电子变换器、储能设备和负荷组成,且通过并网变换器与大电网连接,既可并网运行又可离网运行。在并网模式下,为避免变换器频繁动作而引入不必要的损耗,储能系统停止工作,直流微电网通过并网变换器与大电网实现能量互换,这里不做详细讨论。本文着重研究离网模式下混合储能的暂态特性,由超级电容响应系统净功率的高频部分,提高了系统的动态性,蓄电池响应系统净功率的低频部分,避免了负载突变时的电流尖峰,延长了其使用寿命。

为了简化分析,假定分布式系统的能量仅来自于光伏板,且其作为系统的功率终端,始终工作在最大功率跟踪模式(MPPT);超级电容和蓄电池作为松弛终端补偿光伏与负载间的电流差额,维持母线电压的稳定。直流微电网结构如图1所示。

图1中,混合储能模块由超级电容、蓄电池和Buck/Boost变换器组成,实现能量双向流动,光伏模块经Boost变换器与直流母线相连,本地负载由DC/DC、DC/AC变换器和阻性负载模拟。其中, U_{dc} 为直流

母线电压; U_b 和 i_b 分别为蓄电池侧电压和电流; U_{sc} 和 i_{sc} 分别为超级电容侧电压和电流; U_{pv} 和 i_{pv} 分别为光伏侧电压和电流; R_1 和 R_2 为系统负载; i_{ob} 为蓄电池侧变换器 DC/DC1 输出; i_{osc} 为超级电容侧变换器 DC/DC2 输出电流; i_{res} 是光伏板侧变换器输出电流; i_{L1} 和 i_{L2} 是流向负载的电流。

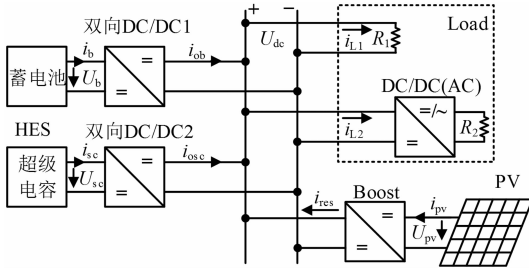


图1 直流微电网结构
Fig.1 The structure of DC microgrid

1.2 传统下垂控制分析

考虑到直流微电网中各微源的功率均分,各变换器一般采用下垂控制,以直流母线电压为参考值,并根据下垂系数大小实时调整出力,实现功率的合理分配,维持系统稳定运行。

针对混合储能单元,变换器采用下垂控制调整出力,传统的 $U-I$ 下垂控制方法可表示为:

$$U_x = U_{cmd} - R_{vx} I_x \quad (1)$$

式中: U_x 和 I_x 分别为变换器的输出电压和电流; R_{vx} 是变换器相应的等效输出电阻,其值的大小与系统容量有关。

由式(1)可知,传统的下垂控制方法能实现微电网中各变换器的功率均分控制,但由于没有考虑超级电容和蓄电池在功率响应速度和能量存储密度等方面的差异,很难充分发挥混合储能系统的优势,实现混合储能对系统功率波动的最优分配。

2 自主分频控制策略

为了充分利用超级电容和蓄电池的优势,解决混合储能暂态功率分配的问题,本文通过在各储能设备的控制电路中增加虚拟电感或虚拟电容控制环,改变各变换器的等效输出阻抗。在系统暂态时,由于虚拟电感 L_v 和虚拟电容 C_v 的作用,使得超级电容迅速吸收暂态功率的高频部分,蓄电池响应功率的低频部分。在系统再次达到稳态时,由于 C_v 对直流分量的阻断作用,超级电容侧不提供能量;而在蓄电池侧,虚拟电感 L_v 的电压忽略不计,由 R_v 调

整储能模块输出电流的大小。混合储能的拓扑及控制结构如图2所示。其中,电感 L_b 、电容 C_{ob} 以及开关阀 S_1 与 S_2 组成变换器 DC/DC1; 电感 L_{sc} 、电容 C_{osc} 与开关阀 S_3 与 S_4 组成双向变换器 DC/DC2; r 为超级电容等效串联的内阻; i_o 为混合储能模块等效的输出电流; U_{ob} 和 U_{osc} 分别为 DC/DC1 和 DC/DC2 的输出电压; U_{cmd} 为直流母线电压参考值; U_{ob}^* 和 U_{osc}^* 分别为蓄电池和超级电容电压外环指令值; $i_{b,ref}$ 和 $i_{sc,ref}$ 分别为蓄电池和超级电容电流内环指令值。

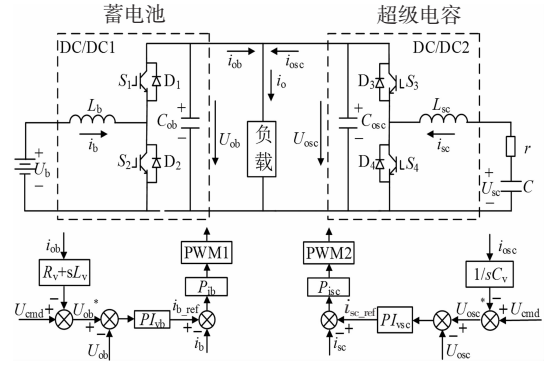


图2 混合储能的拓扑及其控制结构
Fig.2 Topology and control structure for hybrid energy storage

建立混合储能系统的状态平均方程:

$$\begin{cases} L_b \frac{di_b}{dt} = \theta_b (U_b - d_b^* U_{ob}) \\ L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = \theta_{sc} (U_{sc} - R i_{sc} - d_{sc}^* U_{osc}) \\ i_o = \theta_b d_b^* i_b + \theta_{sc} d_{sc}^* i_{sc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: d_b^* 、 d_{sc}^* 分别为变换器 DC/DC1 和 DC/DC2 的占空比; θ_b 、 θ_{sc} 为 DC/DC1 和 DC/DC2 的工作方向。表1列举了混合储能模块各工作模式下参数的选取原则,其中,*表示各开关阀的工作状态不确定,需要结合负载变化和混合储能模块特性进行切换;1表示各储能单元工作在放电状态,-1表示各储能单元工作在充电状态,0表示储能单元处于待机状态; d_b 和 d_{sc} 分别为开关管 S_1 和 S_3 在对应模式下的占空比,其稳态值分别为 $D_b = U_b / U_{cmd}$ 和 $D_{sc} = U_{sc} / U_{cmd}$ 。

表1 混合储能模块工作状态

Tab.1 Working status of HES

S_1	S_2	S_3	S_4	θ_b	θ_{sc}	d_b^*	d_{sc}^*
断	通	*	*	1	*	$1-d_b$	*
通	断	*	*	-1	*	d_b	*
*	*	断	通	*	1	*	$1-d_{sc}$
*	*	通	断	*	-1	*	d_{sc}
断	断	断	断	0	0	0	0

为了简化分析,根据戴维南等效定理可知,蓄

电池和超级电容都可等效为电压源与输出阻抗串联, 而 R_{line1} 和 R_{line2} 分别为两者相对应的线路阻抗, 则混合储能的等效电路如图 3 所示.

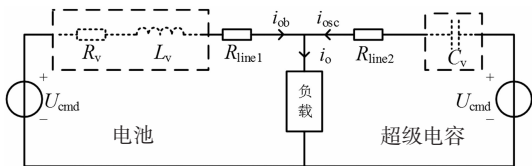


图 3 混合储能等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram for hybrid energy storage

图 3 中, 混合储能模块等效输出电流 i_o 的大小等于负载电流与光伏输出电流 i_{res} 的差值:

$$\begin{cases} i_o = i_{L1} + i_{L2} - i_{res} \\ i_{osc} + i_{ob} = i_o \end{cases} \quad (3)$$

针对蓄电池侧的变换器 DC/DC1, 增加虚拟电感 L_v 与 R_v , 则下垂控制 U/I 表达式(2)可改进为:

$$u_{ob}^*(t) = U_{cmd} - (R_v + R_{line1})i_{ob}(t) - L_v \frac{di_{ob}(t)}{dt} \quad (4)$$

针对超级电容侧的变换器 DC/DC2, 用虚拟电容 C_v 替代 R_v , 则下垂控制 U/I 表达式(2)可改进为:

$$u_{osc}^*(t) = U_{cmd} - R_{line2}i_{osc}(t) - C_v \int_{t_0}^{t_1} i_{osc}(t) dt \quad (5)$$

考虑到线路阻抗的值远小于虚拟阻抗可忽略不计, 对式(4)和式(5)进行拉普拉斯变换可得:

$$\begin{cases} u_{ob}^*(s) = U_{cmd} - R_v i_{ob}(s) - s L_v i_{ob}(s) \\ u_{osc}^*(s) = U_{cmd} - \frac{1}{s C_v} i_{osc}(s) \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)可得:

$$\begin{cases} i_{ob}(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{R_v}{L_v} s + \frac{1}{C_v L_v}} i_o(s) \\ i_{osc}(s) = \frac{s^2 + \frac{R_v}{L_v} s}{s^2 + \frac{R_v}{L_v} s + \frac{1}{C_v L_v}} i_o(s) \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)整理为标准形式:

$$\begin{cases} i_{ob}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} i_o(s) = H_B(s) i_o(s) \\ i_{osc}(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_n s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} i_o(s) = H_{SC}(s) i_o(s) \end{cases} \quad (8)$$

其中自然频率和阻尼比的表达式为:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{1}{L_v C_v}} \\ \xi = \frac{R_v}{2} \sqrt{\frac{C_v}{L_v}} \end{cases} \quad (9)$$

设定 ω_b 为 $H_B(s)$ 的截止频率, 根据其定义可得:

$$|H_B(j\omega_b)| = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + 4\xi^2 \omega_n^2 \omega_b^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

由式(10)计算可得:

$$\omega_n = \omega_b \sqrt{(2\xi^2 - 1) + \sqrt{(2\xi^2 - 1)^2 + 1}} \quad (11)$$

从式(8)可以看出 $H_B(s)$ 和 $H_{SC}(s)$ 类似于一个二阶的低通和高通滤波器, 因此根据蓄电池和超级电容的工作特性, 选择合理的 ω_b 参数和阻尼比 ξ , 并依据式(10)计算出虚拟电感 L_v 和虚拟电容 C_v 的值, 使混合储能各单元在负载突变时能自主分频响应其功率波动, 以提高系统的动态特性.

用单位阶跃信号模拟负载突变进行理论分析, 蓄电池和超级电容的动态响应如图 4 所示. 在负载突变后, 超级电容能迅速响应, 然后逐渐衰减至 0; 而蓄电池则缓慢增加, 最终等于负载所需要提供的电流值.

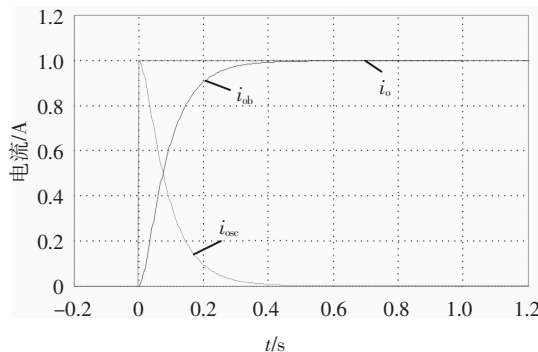


图 4 i_{ob} 和 i_{osc} 单位阶跃响应图

Fig.4 Unit step response diagrams of i_{ob} and i_{osc}

3 系统控制参数设计

在实际应用系统中, 储能单元的等效输出阻抗与电压电流双环及系统参数的选择息息相关, 而合理的参数选择是实现电压波动时功率自主分频及系统稳定运行的关键.

3.1 双向 DC/DC 变换器的控制模型分析

混合储能采用改进下垂控制时的整体控制框图如图 5 所示. 电压外环采用 PI 控制维持母线电压的稳定, 电流内环采用 P 控制实现补偿电流的快速跟踪. 其中, U_{ox} 和 i_{ox} 分别为蓄电池或超级电容侧 DC/DC 变换器输出的电压和电流值; U_{ix} 为蓄电池或超级电容的端电压; i_{x_ref} 对应于蓄电池或超级电容电流内环指令值; i_x 分别是蓄电池或者超级电容的输出电流的实际值; G_x 为电感电压转换为电流值的传递函数; Z_{vx} 对应于蓄电池或超级电容引入的虚拟阻抗或虚拟电容值; C_{ox} 分别为变换器 DC/DC1 和

DC/DC2 的输出电容值;当储能单元为蓄电池时用 b 代替下标 x,为超级电容时用 sc 代替下标 x。

由于电流内环的响应速度远大于电压外环,在分析电压环参数与 DC/DC 变换器等效输出阻抗时,

可将电流内环简化为 $K_{cx} = 1$ 。设 k_{vpx} 和 k_{vix} 对应于电压外环 PI_{vx} 调节器的比例系数和积分系数,则从图 5 中可计算出变换器输出电压为:

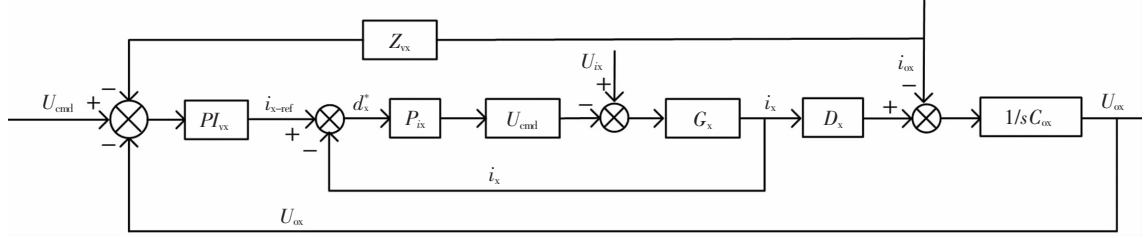


图 5 混合储能改进的下垂控制框图

Fig. 5 The improved droop control diagram for hybrid energy storage

$$U_{ox}(s) = \frac{k_{vpx}D_x^*s + k_{vix}D_x^*}{C_{ox}s^2 + k_{vpx}D_x^*s + k_{vix}D_x^*} U_{cml} - \frac{(k_{vpx}D_x^*Z_{vx}^* + 1)s + k_{vix}D_x^*Z_{vx}^*}{C_{ox}s^2 + k_{vpx}D_x^*s + k_{vix}D_x^*} i_{ox} \quad (12)$$

则变换器的等效输出阻抗为:

$$Z_{ox} = \frac{(k_{vpx}D_x^*Z_{vx}^* + 1)s + k_{vix}D_x^*Z_{vx}^*}{C_{ox}s^2 + k_{vpx}D_x^*s + k_{vix}D_x^*} \quad (13)$$

相应的电压外环的开环传递函数为:

$$G_{vx}(s) = (1 - D_x) \left(k_{vpx} + \frac{k_{vix}}{s} \right) \frac{k_{cx}}{sC_{ox}} \quad (14)$$

为了确保系统的稳定性,电压外环的相角裕度应不小于 $\pi/4$ 且 k_{vix}/k_{vpx} 的值约为截止频率 ω_{vx} 的 $0.1 \sim 0.2$ ^[25],因此电压外环参数可以设计为:

$$\begin{cases} \left| \left(k_{vpx} + \frac{k_{vix}}{s} \right) \frac{k_{cx}}{sC_{ox}} D_x^* \right|_{s=j\omega_{vx}} = 1 \\ \angle \left(k_{vpx} + \frac{k_{vix}}{s} \right) \frac{k_{cx}}{sC_{ox}} D_x^* \Big|_{s=j\omega_{vx}} \geq -\frac{3\pi}{4} \end{cases} \quad (15)$$

取 $k_{vix}/k_{vpx} = 0.1\omega_{vx}$,对式(15)进行整理可得:

$$\begin{cases} k_{vpx} = \frac{C_{ox}\omega_{vx}}{D_x^*} \\ k_{vix} = \frac{0.1C_{ox}\omega_{vx}^2}{D_x^*} \end{cases} \quad (16)$$

此外,对于蓄电池侧双向变换器 DC/DC1 的控制,图 5 中 Z_{vx} 和 G_x 表示为:

$$\begin{cases} Z_{vx}(s) = Z_{vb}(s) = R_v + sL_v \\ G_x(s) = \theta_{vl}/sL_x \end{cases} \quad (17)$$

对于超级电容侧双向变换器 DC/DC2 的控制,图 5 中 Z_{vx} 和 G_x 表示为:

$$\begin{cases} Z_{vx}(s) = Z_{vsc}(s) = 1/sC_v \\ G_x(s) = \theta_x/(sL_x + r) \end{cases} \quad (18)$$

联立式(12)~式(18)可得:

$$Z_{ox}(s) = \frac{L_v\omega_{vb}^2s^2 + (1/C_{ob} + R_v\omega_{vb} + 0.1L_v\omega_{vb}^2)s + 0.1R_v\omega_{vb}^2}{s^2 + \omega_{vb}^2s + 0.1\omega_{vb}^2} \quad (19)$$

$$Z_{osc}(s) = \frac{1}{C_vC_{osc}s} \frac{C_v s^2 + \omega_{vsc}C_{osc}s + 0.1\omega_{vsc}^2C_{osc}}{s^2 + \omega_{vsc}s + 0.1\omega_{vsc}^2} \quad (20)$$

$$Z_o(s) = Z_{ob}(s) // Z_{osc}(s) = \frac{Z_{ob}(s)Z_{osc}(s)}{Z_{ob}(s) + Z_{osc}(s)} \quad (21)$$

从式(20)和式(21)可以看出,储能单元与双向变换器 DC/DC 并不是一个理想的电压源,其等效输出阻抗与所引入的虚拟阻抗值及电压电流环的参数选取相关。

3.2 虚拟阻抗参数设计

为了使储能系统更好地响应负载功率波动,调整引入的虚拟阻抗参数,尽可能地使系统等效输出阻抗在低频段为阻感性而在高频段呈现为容性,从而实现系统能量的自主分频。本文绘制了系统等效输出阻抗 Z_o 、电池侧等效输出阻抗 Z_{ob} 、超级电容等效输出阻抗 Z_{osc} 采用不同虚拟电容 C_v 、虚拟电感 L_v 参数时的波特图。表 2 和表 3 分别为系统参数和不同截止频率下虚拟阻抗参数,其中每组参数都能保证储能系统的稳定运行。

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

参数	数值
直流母线参考电压 U_{cml}/V	270
蓄电池额定电压 U_{bN}/V	200
超级电容额定电压 U_{scN}/V	150
蓄电池侧电感 L_b/H	0.002
超级电容侧电感 L_c/H	0.002
蓄电池侧变换器输出电容 $C_{ob}/\mu F$	220
超级电容侧变换器输出电容 $C_{osc}/\mu F$	4×470
超级电容侧电压环带宽 ω_{vsc}/Hz	2π×200
蓄电池侧电压环带宽 ω_{vb}/Hz	2π×200

表 3 虚拟电容 C_v 、电感 L_v 、电阻 R_v 参数
Tab.3 The parameters of virtual resistor R_v , virtual inductance L_v , and virtual capacitor C_v

序号	等效阻尼 ξ	截止频率 ω_b/Hz	虚拟电阻 R_v/Ω	虚拟电感 L_v/H	虚拟电容 C_v/F
1	无	无	0.8	0	0
2	1.2	$0.8 \times 2\pi$	0.8	0.033 1	0.298 1
3	1.2	$2 \times 2\pi$	0.8	0.013 2	0.119 2
4	1.2	$6 \times 2\pi$	0.8	0.004 4	0.039 7

从图 6 可以看出,采用传统的下垂控制时,系统等效输出阻抗 Z_o 与储能单元等效输出阻抗 Z_{ob} 和 Z_{osc} 相近,使得系统在稳态时仍需有超级电容配合蓄电池一起为负载供电.而在负荷突变时,蓄电池也要承担一部分冲击电流,影响电池的使用寿命,降低了系统的动态响应速度.

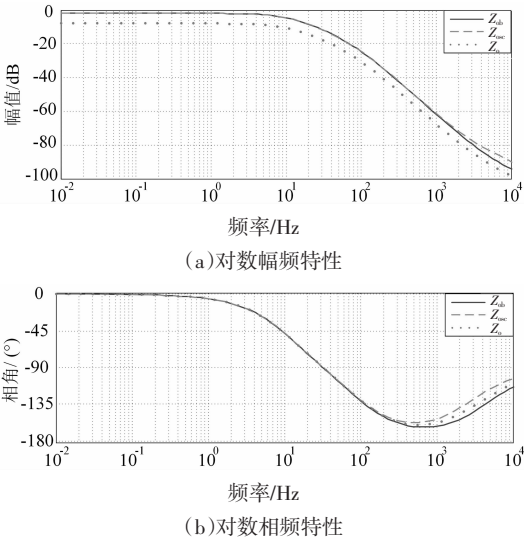


图 6 采用传统下垂控制变换器 DC/DC 等效输出阻抗波特图

Fig.6 Equivalent output impedance bode diagrams for DC/DC converter by using the traditional droop control

从图 7 可以看出,在增加虚拟电感 L_v 和虚拟电容 C_v 后,系统等效输出阻抗 Z_o 在低频段主要由 Z_{ob} 决定,而在高频段由 Z_{osc} 主导,即改进的下垂控制策略可使系统在低频段和高频段呈现出不同的阻抗特性,从而实现系统功率的自主分频.当负荷突变时,超级电容迅速响应功率波动的高频部分,而蓄电池缓慢变化以响应系统功率波动的低频部分;当系统再次达到稳态时,由蓄电池提供负载所缺乏的功率,而超级电容侧变换器 DC/DC2 输出电流变为 0,从而实现混合储能功率的合理分配.

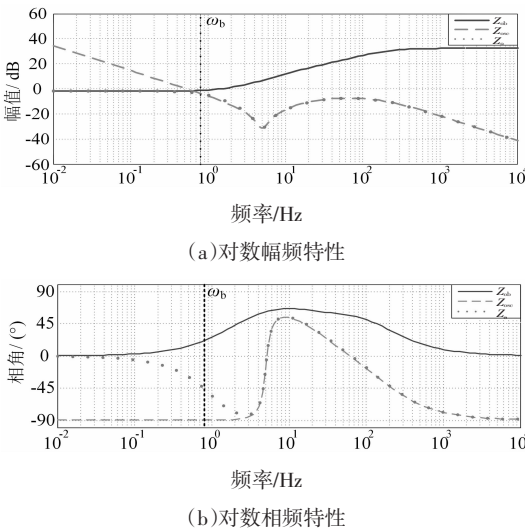


图 7 当 $\omega_b=0.8 \times 2\pi$ 时变换器 DC/DC 等效输出阻抗波特图
Fig.7 Equivalent output impedance bode diagrams for DC/DC converter when $\omega_b=0.8 \times 2\pi$

图 7~图 9 是在保证其他参数不变的前提下,通过改变截止频率 ω_b ,调节虚拟电感 L_v 和虚拟电容 C_v 的值,改变储能电容和储能电池的动态响应时间.对比可以看出,随着 ω_b 值的增大,响应速度变快,但其分频响应系统功率的效果会有所削弱,且如果参数选取不当,在其交接频率处可能会出现超调,导致储能单元的反复充放电,引起不必要的损耗并缩短其使用寿命.因此,本文在保证系统功率能够实现合理分配且不发生超调的前提下,充分利用储能电容和储能电池的动态特性,将系统的交接频率设计在 1~10 Hz 之间,故选用第 3 组参数.

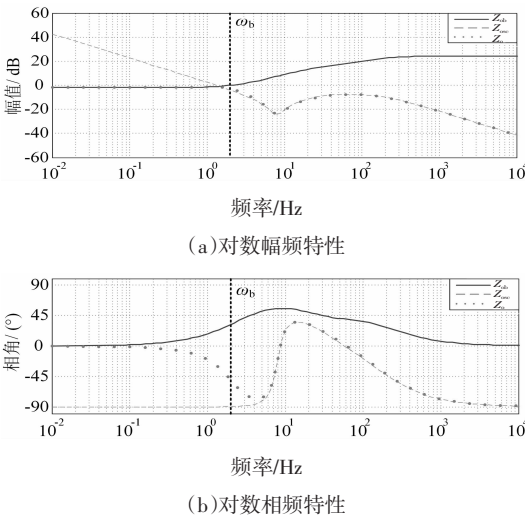


图 8 当 $\omega_b=2 \times 2\pi$ 时变换器 DC/DC 等效输出阻抗波特图
Fig.8 Equivalent output impedance bode diagrams for DC/DC converter when $\omega_b=2 \times 2\pi$

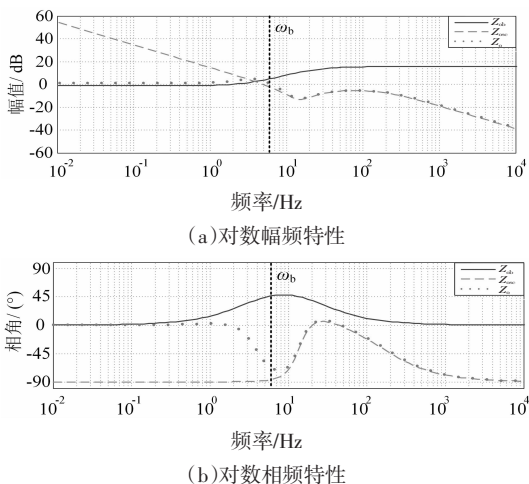


图9 当 $\omega_b=6 \times 2\pi$ 时变换器 DC/DC 等效输出阻抗波特图
Fig.9 Equivalent output impedance bode diagrams for DC/DC converter when $\omega_b=6 \times 2\pi$

4 仿真验证

为了验证本文针对混合储能模块所提的自主分频能量管理控制策略的有效性,本文按照图1所示的拓扑结构和表1所列参数在 Matlab 仿真环境中搭建了低压直流微电网模型,其中,光伏模块采用 MPPT 控制,保证最大功率输出,储能模块采用下垂控制,维持系统可靠稳定的运行。

1) 传统下垂控制

图10所示为采用传统下垂控制策略时混合储能输出功率 P 、直流母线电压 U_{dc} 、蓄电池输出电流 i_{ob} 以及超级电容输出电流 i_{osc} 的波形图。

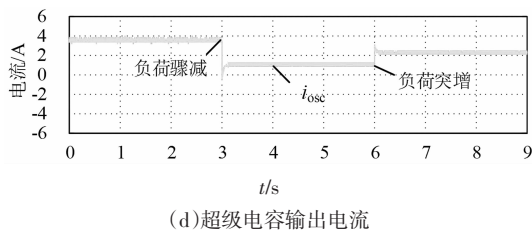
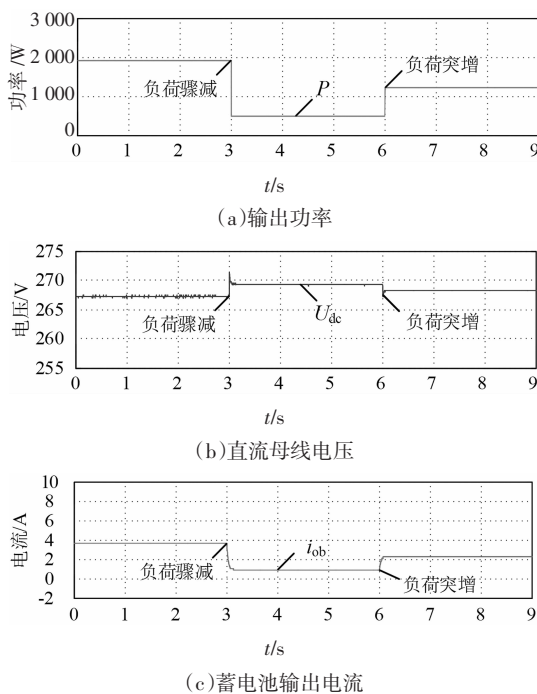
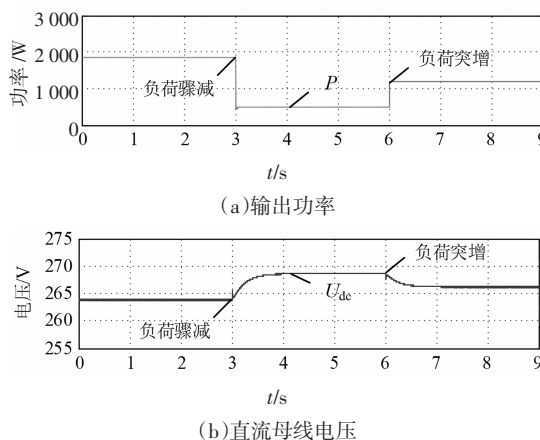


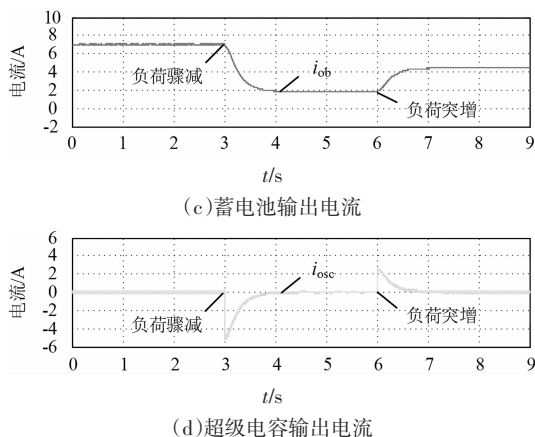
图10 采用传统下垂控制混合储能对应的仿真波形图
Fig.10 Simulation waveforms of hybrid energy storage by adopting the traditional droop control

在系统稳定运行3s后,负荷骤减,直流母线电压由原来的267V增加至269V,蓄电池放电电流由3.65A变为1.23A,超级电容输出电流由3.62A变为1.02A持续放电使直流母线电压恢复到新的稳定值。在系统投入运行7s后,负荷突增,直流母线 U_{dc} 出现了短暂的跌落,蓄电池输出电流则增至2.25A进行放电,超级电容放电电流则由1.02A变为2.1A,使母线电压最终稳定在268V。即该运行模式下,负荷突变,蓄电池仍需承受部分高频电流;系统再次达到稳态时,超级电容也需协调蓄电池一起为负荷供电维持系统功率的平衡,这不仅降低了混合储能单元的使用寿命,还影响了混合储能单元的使用效率。

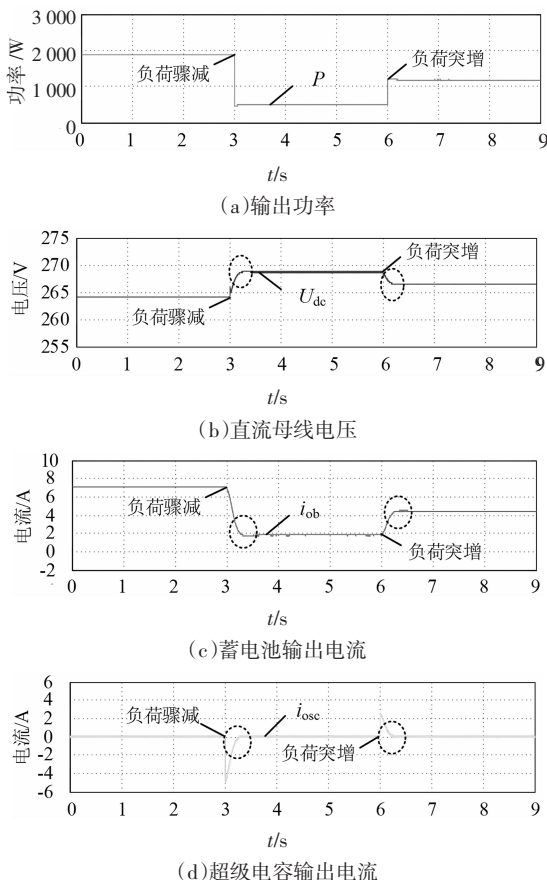
2) 改进的下垂控制

图11~图13为采用改进下垂控制策略时混合储能输出功率 P 、直流母线电压 U_{dc} 、蓄电池输出电流 i_{ob} 以及超级电容输出电流 i_{osc} 的波形图。与图10对比可知,各储能单元在引入虚拟阻抗或虚拟电容后,超级电容在负荷突变时能迅速吸收功率波动的高频部分,提高系统的动态性;蓄电池则缓慢变化提供功率波动的低频成分,以维持直流母线电压稳定。且采用改进的下垂控制策略后,无论负载如何变化,在系统再次达到稳态后,超级电容输出电流均恢复至0,由蓄电池提供系统短缺的功率,但由于虚拟电阻的存在,使得母线电压值有所降低。



图 11 当 $\omega_b=0.8 \times 2\pi$ 时混合储能对应的仿真波形图Fig.11 Simulation waveforms of hybrid energy storage when $\omega_b=0.8 \times 2\pi$

由图 11 可知,在系统运行 3 s 后,负荷骤减,超级电容迅速动作,其最大的充电电流达到 5 A 且在系统稳定后重新恢复至 0; 电池侧的放电电流从 7.05 A 缓慢减小至 1.51 A,维持直流母线电压稳定。在系统运行 7 s 后,负荷增大,超级电容迅速放电,其最大输出电流为 2.56 A,随后恢复至 0; 而蓄电池

图 12 当 $\omega_b=2 \times 2\pi$ 时混合储能对应的仿真波形图Fig.12 Simulation waveforms of hybrid energy storage when $\omega_b=2 \times 2\pi$

的输出电流则缓慢增加至 4.45 A, 使直流母线电压最终稳定在 266 V. 故改进的下垂控制策略针对各储能单元在功率响应速度和能量存储密度等方面的差异, 能使超级电容和蓄电池自主分频响应系统功率波动, 实现能量的最有利利用。

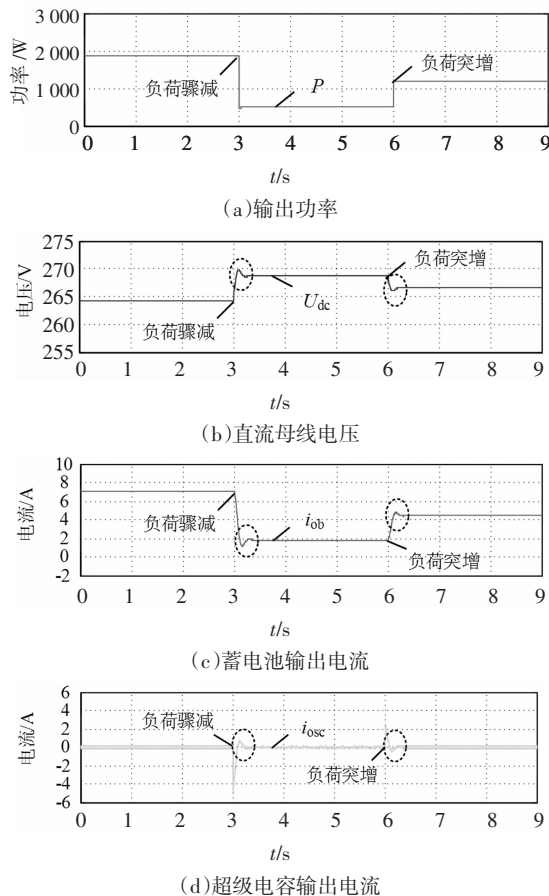
图 13 当 $\omega_b=6 \times 2\pi$ 时混合储能对应的仿真波形图Fig.13 Simulation waveforms of hybrid energy storage when $\omega_b=6 \times 2\pi$

图 12 与图 11 相比, 整体的变化趋势相同, 但系统在负荷突变后达到稳态的时间由 1 s 缩短为 0.4 s, 即在保证系统功率合理分频的情况下, 增大截止频率 ω_b 的值以调整 L_v 和 C_v 的大小, 系统的动态响应速度能显著提高. 但由图 13 可知, 随着截止频率 ω_b 的持续增大, 超级电容在负荷骤变后可能会出现反复充放电的过程, 这不仅增大了系统功率损耗, 还缩短了储能单元的使用寿命. 因此, 各储能单元在引入虚拟阻抗或虚拟电容控制环时, 应结合控制系统选择合理的参数, 以实现混合储能对系统功率波动的最优分配。

5 结论

本文以直流微电网离网运行时混合储能模块功率如何分配为研究对象, 考虑超级电容功率密度

大及蓄电池能量密度高的特性,提出了一种适用于混合储能系统的功率自主分频控制方法,通过在各储能单元的下垂控制中引入虚拟阻感或虚拟电容控制环,改变各变换器的等效输出阻抗值,实现系统功率的合理分配。仿真结果表明,该方法能够使负载功率波动的高频分量和低频分量自动解耦,并自主分配给超级电容和蓄电池,从而提高了混合储能的动态响应,延长了储能单元的使用寿命,维持了系统安全稳定运行。

参考文献

- [1] 赵波,薛美东,陈荣柱,等.高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型[J].电力系统自动化,2014,38(7):1—8.
ZHAO B, XUE M D, CHEN R Z, *et al.* An economic dispatch model for microgrid with high renewable energy resource penetration considering forecast errors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7):1—8. (In Chinese)
- [2] SINGH R S S, ABBOD M, BALACHANDRAN W. A design scheme of control/optimization system for hybrid solar-wind and battery energy storages system [C]//2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Portugal: IEEE, 2016: 1—6.
- [3] JUSTO J J, MWASILU F, JU L, *et al.* AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 24: 387—405.
- [4] CHEN D, XU L. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1897—1905.
- [5] CHOI M E, KIM S W, SEO S W. Energy management optimization in a battery/super capacitor hybrid energy storage system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 463—472.
- [6] 王成山,洪博文,郭力.不同场景下光蓄微电网调度策略[J].电网技术,2013,37(7):1776—1782.
WANG C S, HONG B W, GUO L. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios [J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1776—1782. (In Chinese)
- [7] XU Y L, ZHANG W, HUG G, *et al.* Cooperative control of distributed energy storage systems in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 1—11.
- [8] 刘舒,李正力,王翼,等.含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2016,44(3):78—84.
LIU S, LI Z L, WANG Y, *et al.* Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78—84. (In Chinese)
- [9] 李凡,张建成,朱立刚.平抑光伏功率波动的混合储能系统控制方法[J].电源技术,2016,40(2):397—399, 472.
LI F, ZHANG J C, ZHU L G. Control method of hybrid energy storage system for photovoltaic power balancing [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(2): 397—399, 472. (In Chinese)
- [10] KAKIGANO H, NISHINO A, MIURA Y, *et al.* Distribution voltage control for DC microgrid by converters of energy storages considering the stored energy [C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta: IEEE, 2010: 2851—2856.
- [11] 周小平,陈燕东,罗安,等.一种单相-三相混合微电网结构及其能量协调控制方法[J].中国电机工程学报,2016,36(24): 6759—6768, 6930.
ZHOU X P, CHEN Y D, LUO A, *et al.* A hybrid single-phase/three-phase microgrid structure and its energy coordinated control method [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6759—6768, 6930. (In Chinese)
- [12] 程启明,徐聪,程尹曼,等.基于混合储能技术的光储式充电站直流微电网系统协调控制[J].高电压技术,2016,42(7):2073—2083.
CHENG Q M, XU C, CHENG Y M, *et al.* Coordination control of PV charging station DC microgrid system based on hybrid energy storage technology [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2073—2083. (In Chinese)
- [13] ALBERTO S, ALDO S, CONSTANTINA L. Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications [J]. Journal of Power Sources, 2014, 258(15): 395—407.
- [14] 熊雄,王江波,杨仁刚,等.微电网中混合储能模糊自适应控制策略[J].电网技术,2015,39(3):677—681.
XIONG X, WANG J B, YANG R G, *et al.* A fuzzy adaptive control strategy for composite energy storage system to cope with output power fluctuation of intermittent energy source in microgrid [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 677—681. (In Chinese)
- [15] 张纯江,董杰,刘君,等.蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J].电工技术学报,2014,29(4):334—340.
ZHANG C J, DONG J, LIU J, *et al.* A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334—340. (In Chinese)
- [16] ZHOU 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.
- [17] ITO Y, ZHONG Q Y, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system [C]//Proceedings of Conference on the 4th International Power Electronics and Motion Control. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2004: 1740—1745.
- [18] 谢玲玲,时斌,华国玉,等.基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术[J].电网技术,2013,37(4):992—998.
XIE L L, SHI B, HUA G Y, *et al.* Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 992—998. (In Chinese)
- [19] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 21—29.
- [20] WU D, TANG F, GUERRERO J M, *et al.* Autonomous active and reactive power distribution strategy in islanded microgrids [C]//Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Fort Worth: IEEE, 2014: 2126—2131.
- [21] 张国驹,唐西胜,齐智平.超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J].电力系统自动化,2010,34(12):85—89.
ZHANG G J, TANG X S, QI Z P. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85—89. (In Chinese)
- [22] 孟润泉,刘家赢,文波,等.直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J].高电压技术,2015,41(7):2186—2193.
MENG R Q, LIU J Y, WEN B, *et al.* Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for dc micro-grids [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186—2193. (In Chinese)
- [23] 文波,秦文萍,韩肖清,等.基于电压下垂法的直流微网混合储能系统控制策略[J].电网技术,2015,39(4):892—898.
WEN B, QIN W P, HAN X Q, *et al.* Control strategy of hybrid energy storage systems in dc microgrid based on voltage droop method [J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892—898. (In Chinese)
- [24] GU Y J, LI W H, HE X N. Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of dc microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2328—2337.
- [25] DAM D H, LEE H H. A power distributed control method for proportional load power sharing and bus voltage restoration in a dc microgrids [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2018, 54(4): 3616—3625.