

蓄电池-超级电容混合储能系统性能优化

柴秀慧¹, 张纯江¹, 柴建国², 李艳², 刚磊¹

(1. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 天津航天机电设备研究所, 天津 300457)

摘要: 风能和太阳能的不确定性和负载功率突变都会引起直流母线电压波动, 从而影响连接于直流母线的功率变换器电能质量, 配置混合储能系统 (HESS) 可以提高直流母线电压性能和保证系统功率平衡。针对蓄电池-超级电容混合储能系统, 本文采用蓄电池储能系统稳定直流母线电压, 超级电容储能系统采用基于高通滤波器的单电流环的控制策略, 建立 HESS 控制模型, 推导出在负载扰动下直流母线波动电压的时域表达式, 以此为基础详细分析电压外环开环剪切频率 ω_{cv} 和高通滤波器转折频率 ω_0 与 ω_{cv} 的比值 k_H 对 HESS 抗干扰性能和超级电容容量的影响, 得出 HESS 控制参数设计方法。按最大剪切频率 f_{cvmax} 设计电压外环以达到整体优化系统性能和降低成本的目的。 k_H 的约束条件为 $k_H \leq 0.5$, 并给出不同目标下 k_H 选择依据。通过设计 HESS 控制参数, 可以有效抑制直流母线电压波动, 达到优化系统性能的目的。最后, 通过 2MW 储能系统仿真模型和小功率实验平台的结果验证了理论分析的正确性和可行性。

关键词: 混合储能系统; 性能优化; 抗干扰性能; 蓄电池; 超级电容器

DOI: 10.12067/ATEEE1907036 **文章编号:** 1003-3076(2019)09-0033-09 **中图分类号:** TM464

1 引言

目前, 直流储能系统被广泛应用于分布式电源和直流微电网中。由于风能和太阳能具有间歇性、波动性、不可预测性, 为减小其波动对发电系统的影响^[1], 提高电能质量和保证系统功率平衡, 可以在单台分布式电源直流侧配备储能系统^[2,3], 或在直流微电网中配置大功率储能系统来提供恒定的直流电压支撑^[4,5]。

目前, 蓄电池储能系统和超级电容储能系统已成为主要能源存储系统^[6]。受储能机理的限制, 单一储能方式无法同时满足系统对能量和功率的要求, 为了优化储能系统的综合性能, 混合储能系统 (Hybrid Energy Storage System, HESS) 得到广泛应用^[7]。目前, 应用最为广泛的是蓄电池-超级电容混合储能系统, 覆盖了大范围的电力和能源需求, 具有如下优点^[8]: ①提高电池寿命; ②减小电池大小, 从

而降低了成本; ③降低电池的电压应力; ④改善电力发电和负荷需求之间的平衡。

现在应用较为广泛的 HESS 结构为蓄电池与超级电容通过各自串联变换器并联连接到直流母线上^[9,10]。针对并联型超级电容-蓄电池 HESS, 已有许多文献对其控制策略进行了研究。目前, 以稳定直流母线电压并抑制直流电压波动为目标的 HESS 综合控制策略主要有两种: ①超级电容储能系统和蓄电池储能系统共用一个电压外环来控制直流母线电压恒定, 提取电压外环 PI 输出的高/低频分量分别作为超级电容和蓄电池电流参考, 从而实现直流母线功率高/低频分量的控制^[8], 这里高/低频电流参考通过低通滤波器运算得到; ②蓄电池储能系统通过双闭环控制稳定直流母线电压, 而超级电容储能系统通过母线功率或电流的高频分量提取得到超级电容电流参考, 并通过单电流环控制来抑制直流母线电压波动^[11], 对于高频分量提取现在应用最为

收稿日期: 2019-07-16
基金项目: 河北省自然科学基金项目 (E2017203227; E2018203152)、燕山大学青年基础项目 (16LGB008)、燕山大学博士基金项目 (B1027)
作者简介: 柴秀慧 (1984-), 女, 山西籍, 讲师, 博士, 研究方向为风力发电变流器及控制技术、储能系统功率流控制等; 张纯江 (1961-), 男, 黑龙江籍, 教授, 博士, 研究方向为可再生能源分布式发电及控制技术等。

广泛的是高通滤波器^[12]。

上述两种方法中涉及到低通滤波器和高通滤波器,通过滤波器间接或直接提取得到高频分量,而滤波器转折频率的选取对系统性能有至关重要的影响,对于该部分的研究目前很少。本文针对滤波器转折频率和电压外环开环剪切频率设计进行研究,以达到优化系统性能的目标。首先对单一蓄电池储能系统进行分析,建立控制模型,得出直流母线电压外环控制参数设计方法,分析负载扰动下的直流母线电压性能,为之后 HESS 分析奠定基础。以已有 HESS 控制策略为研究对象,建立 HESS 控制模型,推导出在负载扰动下的直流母线波动电压的时域表达式,以此为基础详细分析电压外环开环剪切频率 f_{cv} 和高通滤波器转折频率 ω_0 与 ω_{cv} 的比值 k_H 对 HESS 的抗干扰性能和超级电容容量的影响,得出 HESS 控制参数优化设计方法。最后,通过仿真和实验验证了理论分析的正确性和可行性。

2 单一蓄电池储能系统的性能分析

为了保证直流母线电压恒定,储能系统必须有能量型储能单元为系统提供长时间的电能支撑,本文采用的能量型储能单元为蓄电池。

2.1 双向 DC/DC 变换器拓扑及数学模型

储能元件通过变换器连接到直流母线上,因此,采用双向 DC/DC 变换器来实现电平的变换及能量的双向流动。DC/DC 变换器拓扑结构如图 1 所示。 L 为升压滤波电感,开关管 S_{bat1} 和 S_{bat2} 为互补开关, C_{bus} 为直流母线滤波电容, u_{bus} 为直流母线电压, u_{bat} 为储能元件的端电压, i_{bat} 为蓄电池电感电流, i_{D_bat} 为开关管 S_{bat2} 的续流电流, i_{bus} 为母线电流。

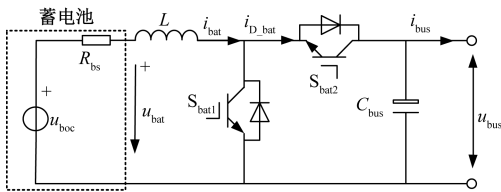


图 1 双向 DC/DC 变换器电路结构图

Fig.1 Diagram of bidirectional DC/DC converter

双向 DC/DC 变换器输入侧数学模型为:

$$(1 - s_{bat})u_{bus} = -L \frac{di_{bat}}{dt} - R_e i_{bat} + u_{bat} \quad (1)$$

式中, R_e 为电感等效电阻 (Ω); s_{bat} 为开关函数, $s_{bat} = 1$ 时, S_{bat1} 导通, S_{bat2} 关断; $s_{bat} = 0$ 时, S_{bat1} 关断, S_{bat2} 导通。

2.2 蓄电池储能系统控制策略

储能系统的目的是提供恒定的直流电压支撑,故蓄电池的控制策略采用直流母线电压外环和电感电流内环的双闭环结构。根据式(1)可以建立电流内环控制模型,控制器采用 PI 控制器,电流环控制原理及控制参数设计方法许多论文中都有相关介绍,本文侧重点在于直流母线性能分析,因此电流环相关设计不再赘述。

根据基尔霍夫电流定律及功率守恒定律,可知直流母线侧的电流关系式为:

$$\begin{cases} i_{D_bat} = C_{bus} \frac{du_{bus}}{dt} + i_{bus} \\ i_{D_bat} = \frac{u_{bat}}{u_{bus}} i_{bat} \end{cases} \quad (2)$$

直流电压外环将直流母线电压参考值 u_{bus}^* 与反馈值 u_{bus} 比较,通过电压环控制器 $H_v(s)$ 得到蓄电池的电感电流参考值 i_{bat}^* , 即

$$i_{bat}^* = H_v(s)(u_{bus}^* - u_{bus}) \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)建立直流电压外环的控制结构图,如图 2 所示。其中, k_v 为电压采样系数。 G_{cur_close} 为电流闭环传递函数,分析设计电压外环时,通常可将电流闭环传递函数等效为一个比例环节,即 $G_{cur_close} = 1/k_s$, 其中, k_s 为电流采样系数。

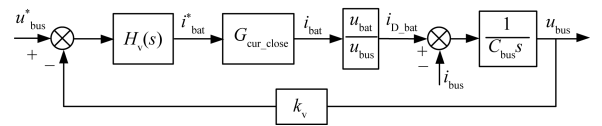


图 2 蓄电池储能系统的电压外环控制结构图

Fig.2 Control structure of battery energy storage system voltage loop

2.3 直流母线电压外环的控制参数设计

直流母线电压外环控制器采用传统 PI 控制器,其传递函数为:

$$H_v(s) = k_{pv} \frac{T_{zv}s + 1}{T_{zv}s} \quad (4)$$

式中, k_{pv} 为电压外环控制器的比例系数; T_{zv} 为电压外环控制器的超前时间常数。

直流母线电压外环的开环传递函数为:

$$G_{ov}(s) = k_{ov} \frac{T_{zv}s + 1}{s^2} \quad (5)$$

式中,电压外环的开环增益 k_{ov} 为:

$$k_{ov} = \frac{k_{pv}k_v u_{bat}}{k_s T_{zv} u_{bus} C_{bus}} \quad (6)$$

根据开环幅频特性,可得开环增益 k_{ov} 与开环剪切频率 ω_{cv} 的关系为:

$$k_{ov} = \frac{\omega_{cv}}{T_{zv}} \quad (7)$$

解由式(6)和式(7)组成的方程组,可得PI调节器的比例系数 k_{pv} 表达式为:

$$k_{pv} = \frac{k_s u_{bus} C_{bus}}{k_v u_{bat}} \omega_{cv} \quad (8)$$

设PI调节器的超前时间常数 $T_{zv} = k_{z_vol}/\omega_{cv}$,当系数 $k_{z_vol} = 2, 3$ 时系统有较好的动静态性能,本文取 $k_{z_vol} = 2$ 。

在工程中,为了避免电压外环和电流内环之间相互影响,一般设计电压外环剪切频率 f_{cv} 小于电流内环剪切频率 f_{c_cur} 的1/5,即 $f_{cv} \leq f_{c_cur}/5$ 。本文中,开关频率为10kHz, f_{c_cur} 为1kHz,则电压外环剪切频率 f_{cv} 的约束条件为 $f_{cv} \leq 200\text{Hz}$ 。随着电压外环开环剪切频率 f_{cv} 增大,系统动态响应速度加快,但高频滤波性能变差。

2.4 蓄电池储能系统性能分析

根据图2可得蓄电池储能系统的直流母线电压表达式为:

$$u_{bus}(s) = G_{ov_close}(s) u_{bus}^* - \frac{s}{s^2 + 2\delta\omega_{nr}s + \omega_{nr}^2} \frac{i_{bus}}{C_{bus}} \quad (9)$$

式中, δ 为阻尼比; ω_{nr} 为无阻尼自然振荡频率; G_{ov_close} 为直流母线电压闭环传递函数:

$$G_{ov_close}(s) = \frac{\omega_{nr}(2\delta s + \omega_{nr})}{s^2 + 2\delta\omega_{nr}s + \omega_{nr}^2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \delta\omega_{nr} = \frac{\omega_{cv}}{2} \\ \omega_{nr} = \frac{\omega_{cv}}{\sqrt{k_{z_vol}}} \end{cases} \quad (11)$$

为了讨论 HESS 的抗扰性能,令 $u_{bus}^* = 0$, 在阶跃扰动 $i_{bus}(s) = I_{bus}/s$ 的作用下,根据式(9)可得直流母线波动电压 $\Delta u_{bus}(s)$ 为:

$$\Delta u_{bus}(s) = -\frac{I_{bus}}{C_{bus}} \frac{1}{s^2 + 2\delta\omega_{nr}s + \omega_{nr}^2} \quad (12)$$

式中, I_{bus} 为阶跃扰动的电流幅值,通常为额定负载电流,对于2MW储能系统,取 $I_{bus} = 2.35\text{kA}$ 。

求式(12)的拉氏反变换,可得直流母线波动电压的时域表达式为:

$$\Delta u_{bus}(t) = -\frac{I_{bus}}{\omega_{dr} C_{bus}} e^{-\delta\omega_{nr}t} \cos(\omega_{dr}t - \frac{\pi}{2}) \quad (13)$$

式中, ω_{dr} 为有阻尼自然振荡频率:

$$\omega_{dr} = \frac{\omega_{cv}}{2} \sqrt{\frac{4 - k_{z_vol}}{k_{z_vol}}} = \frac{\omega_{cv}}{2} \quad (14)$$

从式(13)可知, $\Delta u_{bus}(t)$ 为二阶系统,误差带为 $\pm 5\% \Delta u_{bus}$ 的扰动输出恢复时间 t_v 为:

$$t_v \approx \frac{3}{\delta\omega_{nr}} = \frac{6}{\omega_{cv}} \quad (15)$$

直流母线波动电压基准值 Δu_{busb} 为:

$$\Delta u_{busb} = \frac{I_{bus}}{2\omega_{dr} C_{bus}} \quad (16)$$

扰动下的输出最大降落时间 $t_m = \pi/(2\omega_{cv})$, 则直流母线最大波动电压 Δu_{bus_max} 为:

$$\Delta u_{bus_max} = \frac{I_{bus}}{\omega_{dr} C_{bus}} e^{-\frac{\pi}{4}} \cos(-\frac{\pi}{4}) = \frac{0.6448 I_{bus}}{\omega_{cv} C_{bus}} \quad (17)$$

从式(12)可知,随着电压外环开环剪切频率 ω_{cv} 增大,直流母线最大波动电压 Δu_{bus_max} 、恢复时间 t_v 和输出最大降落时间 t_m 减小,即从抗干扰方面分析,开环剪切频率 ω_{cv} 在约束条件范围内,剪切频率 ω_{cv} 越大,抗干扰性能越好。

2.5 蓄电池储能系统的仿真分析

对单一蓄电池储能系统进行仿真,图3为不同 f_{cv} 值的直流电压和蓄电池电流波形对比,直流母线电压为850V。0.2s时母线输出功率 P_{bus} 由-0.5MW突增为2MW,0.4s时 P_{bus} 由2MW突减为-0.5MW。图3(a)表明,当 $f_{cv} = 25\text{Hz}$ 时,负载突变导致直流母线波动电压较大。与 $f_{cv} = 25\text{Hz}$ 相比,当 $f_{cv} = 200\text{Hz}$ 时,动态抗干扰性能提高,但母线输出功率突变时蓄电池有较高的充/放电率,而较高的充/放电率可能会损坏电池存储系统。通过仿真分析可知,受储能机理的限制,单一蓄电池储能系统无法同时满足系统对能量和功率的要求,将超级电容器与蓄电池混合使用,可以提高系统整体性能。

3 HESS 的控制策略及系统性能分析

3.1 HESS 的拓扑结构

HESS 拓扑结构采用并联型结构,即蓄电池与超级电容通过各自串联变换器并联连接到直流母线,如图4所示。

3.2 HESS 的直流波动抑制原理

HESS 系统的有功功率关系为:

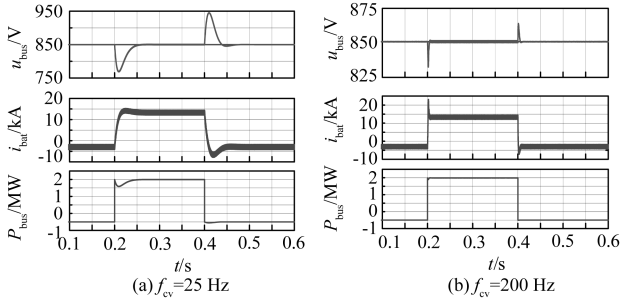
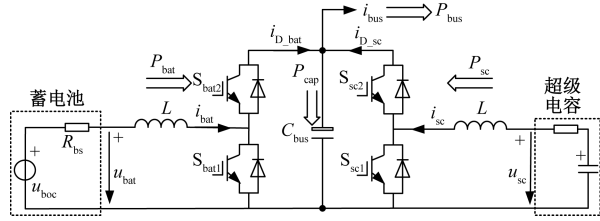
图3 不同 f_{cv} 值的仿真波形对比Fig.3 Simulation waveforms comparison with different f_{cv} 

图4 HESS的拓扑结构

Fig.4 Topology of HESS

$$\begin{cases} P_{sto} = P_{bat} + P_{sc} \\ P_{bus} = P_{sto} - P_{cap} \end{cases} \quad (18)$$

式中, P_{sto} 为 HESS 输出功率; P_{bat} 为蓄电池输出功率; P_{sc} 为超级电容输出功率; P_{cap} 为母线电容吸收功率; P_{bus} 为直流母线输出功率。

电容吸收功率 P_{cap} 与直流电压关系为:

$$P_{cap} = \frac{C_{bus}}{2} \frac{du_{bus}^2}{dt} \quad (19)$$

当母线输出功率 P_{bus} 突变时,期望超级电容提供母线功率 P_{bus} 所需高频分量,减小母线电容功率,从而有效抑制直流电压的波动。这里需注意,超级电容输出功率 P_{sc} 受 HESS 控制参数影响,当控制参数设计不合理时,导致超级电容储能系统作用比例小,能提供的高频分量较小,导致 HESS 近似于单一蓄电池储能系统,由母线电容提供所需高频功率,从而引起较大的直流母线波动电压。为了充分发挥超级电容的优势,达到优化 HESS 系统性能的目标,对 HESS 控制参数进行优化设计。

3.3 HESS 的控制策略及模型建立

HESS 控制策略为:①蓄电池储能系统通过电压外环和电流内环的双闭环控制来支撑直流母线电压;②超级电容储能系统通过基于高通滤波器的单电流环来抑制直流电压波动。通过该控制策略,蓄电池控制负载功率的低频分量,而超级电容控制负

载功率的高频分量。

本文通过单极点高通滤波器提取直流母线电流 i_{bus} 的高频分量用于计算超级电容的电流参考 i_{sc}^* , 其表达式为:

$$i_{sc}^* = k_s \frac{s}{s + \omega_0} \frac{u_{bus}}{u_{sc}} i_{bus} \quad (20)$$

式中, ω_0 为高通滤波器的转折频率,设 $\omega_0 = k_H \omega_{cv}$, k_H 为 ω_0 与开环剪切频率 ω_{cv} 的比例系数。

根据基尔霍夫电流定律,可得 HESS 的直流母线侧电流表达式为:

$$i_{D_bat} + i_{D_sc} = C_{bus} \frac{du_{bus}}{dt} + i_{bus} \quad (21)$$

式(21)建立蓄电池储能系统和超级储能系统之间的联系,根据式(20)和式(21)可得 HESS 控制模型,如图5所示。将图5中虚线框部分整理可得 HESS 的简化控制框图,如图6所示。

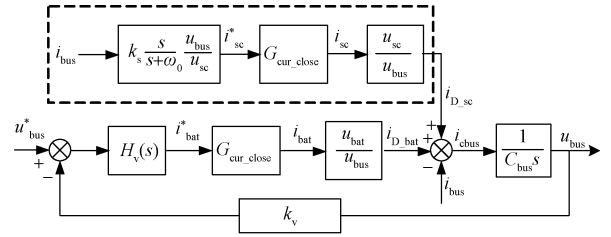


图5 HESS 的控制结构图

Fig.5 Control structure of HESS

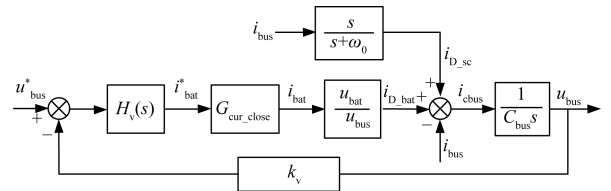


图6 HESS 的简化控制结构图

Fig.6 Simplified control structure of HESS

3.4 HESS 系统性能分析

根据图6,令 $u_{bus}^* = 0$, 在阶跃扰动 $i_{bus}(s) = I_{bus}/s$ 作用下,直流母线波动电压 $\Delta u_{bus}(s)$ 为:

$$\Delta u_{bus}(s) = -\frac{\omega_0 I_{bus}}{C_{bus}} \frac{1}{(s^2 + 2\delta\omega_{nr}s + \omega_{nr}^2)(s + \omega_0)} \quad (22)$$

求式(22)的拉氏反变换,可得直流母线波动电压的时域表达式为:

$$\Delta u_{bus}(t) = -U_c [U_{2K} e^{-\delta\omega_{nr}t} \cos(\omega_{dr}t + \varphi - \frac{\pi}{2}) + e^{-\omega_0 t}] \quad (23)$$

式中

$$\begin{cases} U_c = \frac{I_{bus} k_{z_{vol}} k_H}{C_{bus} \omega_{cv} [k_H k_{z_{vol}} (k_H - 1) + 1]} \\ U_{2K} = 2 \sqrt{\frac{k_{z_{vol}} k_H (k_H - 1) + 1}{4 - k_{z_{vol}}}} \end{cases} \quad (24)$$

从式(23)可知, $\Delta u_{bus}(t)$ 为三阶系统, 有一对共轭复数闭环极点和一项指数衰减项。对比式(17)和式(23)可知, HESS 中指数衰减项 $e^{-\omega_{cv} t}$ (或 $e^{-k_H \omega_{cv} t}$) 是由超级电容储能系统产生; HESS 二阶系统由 HESS 共同作用, 其恢复时间和单一储能系统相同, 由其特征根决定。而超级电容中高通滤波器转折频率 ω_0 的选择影响 U_{2K} , 从而对二阶系统的直流母线波动电压幅值产生影响。

图 7 为 $f_{cv} = 25\text{Hz}$ 时不同参数下直流母线波动电压对比, 为了分析不同 k_H 值对系统性能的影响, 引入三阶系统 3 个极点的实部之比:

$$\beta = \frac{\omega_0}{\delta \omega_{nr}} = 2k_H \quad (25)$$

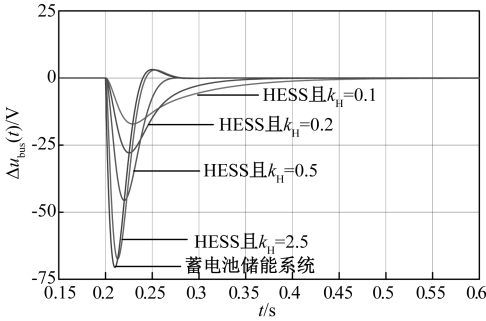


图 7 $f_{cv} = 25\text{Hz}$ 时不同参数下的直流母线波动电压对比

Fig.7 Comparison of DC bus fluctuation voltage under different parameters when $f_{cv} = 25\text{Hz}$

(1) 在 $\beta > 1$ 范围内, $k_H > 0.5$, 随着 k_H 值增大, 指数衰减项 $e^{-k_H \omega_{cv} t}$ 衰减速度变快, 对过渡过程影响减小。当 $k_H \geq 2.5$ 时, 可以忽略指数衰减项 $e^{-k_H \omega_{cv} t}$ 的影响, 三阶系统可以近似地看作一个二阶系统, 此时超级电容储能系统作用比例小, 不能充分发挥其功率型储能元件的优势, 对母线功率 P_{bus} 高频分量控制能力较弱, HESS 近似于单一蓄电池储能系统, 不能有效抑制直流母线电压波动。在该范围内恢复时间 t_v 由二阶衰减振荡环节决定:

$$t_v \approx \frac{3}{\delta \omega_{nr}} = \frac{6}{\omega_{cv}} \quad (26)$$

直流母线波动电压基准值为:

$$\Delta u_{busb} = k_H U \quad (27)$$

(2) 在 $\beta = 1$ 时, $k_H = 0.5$, 说明 3 个闭环极点过渡过程的作用无主次之分, 即超级电容储能系统和蓄电池储能系统共同作用, 且恢复时间 t_v 相同:

$$t_v \approx \frac{3}{\delta \omega_{nr}} = \frac{3}{k_H \omega_{cv}} = \frac{6}{\omega_{cv}} \quad (28)$$

直流母线波动电压基准值为:

$$\Delta u_{busb} = k_H U = U(1 - k_H) \quad (29)$$

(3) 在 $\beta < 1$ 范围内, $k_H < 0.5$ 。指数衰减项 $e^{-k_H \omega_{cv} t}$ 在过渡过程中起主导作用, 且过渡过程无超调。在该范围内恢复时间 t_v 由指数衰减项决定:

$$t_v \approx \frac{3}{k_H \omega_{cv}} \quad (30)$$

直流母线波动电压基准值为:

$$\Delta u_{busb} = U(1 - k_H) \quad (31)$$

从式(23)可知, 直流母线最大波动电压与系数 U_c 相关。从式(24)及图 7 可知, 随着 k_H 的减小, 直流母线最大波动电压减小, 超级电容储能系统在 HESS 中作用比例增大, 对负载扰动下直流母线电压波动抑制能力增强。但在 $k_H \leq 0.5$ 范围内, 根据式(30)及图 7 可知, 随着 k_H 的减小, 扰动输出恢复时间 t_v 增大, 动态恢复速度变慢。

HESS 目标是抑制直流母线电压波动, 该目标要求超级电容储能系统得到充分利用, 因此, 以 $k_H \leq 0.5$ 为约束条件进行高通滤波器带宽设计。恢复时间 t_v 和系数 U_c 都与电压开环剪切频率 ω_{cv} 成反比, 增大 ω_{cv} 可以同时减小直流母线最大波动电压和加快扰动恢复速度, 从而有效提高系统的抗干扰能力, 因此按最大剪切频率 f_{cvmax} 对直流母线电压外环进行设计, 本文中 $f_{cvmax} = f_{c-cur}/5 = 200\text{Hz}$ 。

高通滤波器系数 k_H 在其约束范围 $k_H \leq 0.5$ 内, 根据系统不同目标要求, k_H 选择依据如下:

(1) 以减小成本为主要目标, 保证直流母线波动电压在允许范围内, 取 k_H 可达到的最大值。超级电容的容量关系式如式(24)所示, k_H 值越大, 超级电容充放电时间越短, 所需超级电容的能量越小, 而超级电容容量越小, 成本越低。而且通过最大剪切频率 f_{cvmax} 设计外环, 可以减小成本:

$$C_{sc} \geq \frac{2P_{rate}(\eta + 1)}{k_H \omega_{cv} \eta (U_{scmax}^2 - U_{scmin}^2)} \quad (32)$$

式中, U_{scmin} 和 U_{scmax} 分别为超级电容运行的最小和最大电压; η 为 DC/DC 变换器效率; P_{rate} 为储能系统额定功率。

(2) 以提高动态抗干扰性能为主要目标, 由于

直流母线波动电压最大值与扰动恢复速度之间存在矛盾,因此, k_H 取值由系统直流母线电压性能要求决定。本文在直流母线最大波动电压与扰动恢复速度之间折中考虑,取 $k_H = 0.2$ 。

3.5 不同超级电容的仿真验证分析

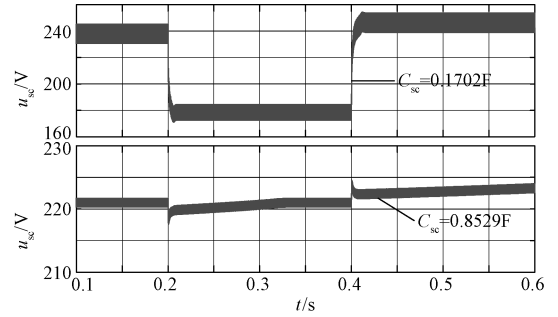
超级电容的参数要求如下:额定电压为 220V, $165V < u_{sc} < 275V$, DC/DC 变换器效率 $\eta = 0.98$, 额定功率 $P_{rate} = 2MW$, 超级电容计算中剪切频率按 $f_{cvmax} = 200Hz$ 设计。以降低成本为主要目标,要求直流母线波动电压在 10V 之内, k_H 的最大值为 0.5,根据式 (32) 计算得 $C_{sc} = 0.1702F$ 。另一组超级电容值计算时只改变 k_H 值,取 $k_H = 0.1$,得 $C_{sc} = 0.8529F$ 。

针对上述两种超级电容进行 HESS 仿真,由于超级电容 $C_{sc} = 0.1702F$ 的选取限制了系统控制器参数,控制参数只能取 $f_{cv} = 200Hz$ 和 $k_H = 0.5$, 仿真结果如图 8 所示。0.2s 时母线输出功率 P_{bus} 由 $-0.5MW$ 突增为 2MW, 0.4s 时 P_{bus} 由 2MW 突减为 $-0.5MW$ 。在相同输出扰动下, $C_{sc} = 0.1702F$ 的系统超级电容端电压变化量大于 $C_{sc} = 0.8529F$ 的系统,但在超级电容波动电压允许范围内。由于控制参数相同,因此两系统的直流母线电压 u_{bus} 、蓄电池电流 $i_{L_{bat}}$ 和超级电容电流 $i_{L_{sc}}$ 响应波形基本相同。该仿真结果证明, k_H 按可达到的最大值取值,可在保证系统性能要求的同时减小成本。

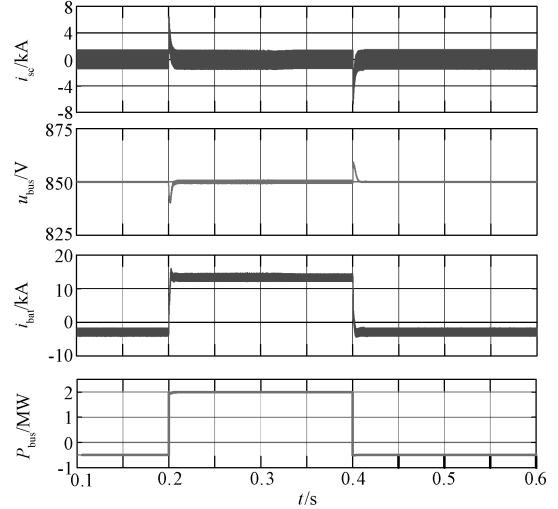
3.6 不同 f_{cv} 和 k_H 值的仿真对比分析

为了保证不同电压开环剪切频率 f_{cv} 和 k_H 值下系统可以稳定运行,以超级电容 $C_{sc} = 0.8529F$ 为基础进行仿真对比分析,仿真结果如图 9 所示。0.2s 时母线输出功率 P_{bus} 由 $-0.5MW$ 突增为 2MW, 0.4s 时 P_{bus} 由 2MW 突减为 $-0.5MW$ 。

当控制参数为 $f_{cv} = 40Hz, k_H = 5$ 时,输出功率 P_{bus} 突加/减时超级电容提供高频能量较少,导致直流母线波动电压较大,超级电容特性没有得到充分发挥,HESS 近似为单一蓄电池储能系统,直流母线电压波形与图 3 (a) 近似。与控制参数采用 $f_{cv} = 40Hz, k_H = 5$ 的系统相比,控制参数采用 $f_{cv} = 40Hz$ 和 $k_H = 0.2$ 时,超级电容提供高频能量增加,直流母线波动电压减小,超级电容特性得到充分发挥,但动态调节时间变长。当控制器按最大剪切频率 $f_{cvmax} = 200Hz$ 和 $k_H = 0.2$ 设计时,与采用 $f_{cv} = 40Hz$ 和 $k_H = 0.2$ 的系统相比,在减小直流母线最大波动电压的



(a) 超级电容端电压



(b) 直流母线电压、蓄电池电流和超级电容电流波形

图 8 不同超级电容值的仿真波形对比

Fig.8 Simulation waveform comparison of different ultracapacitor values

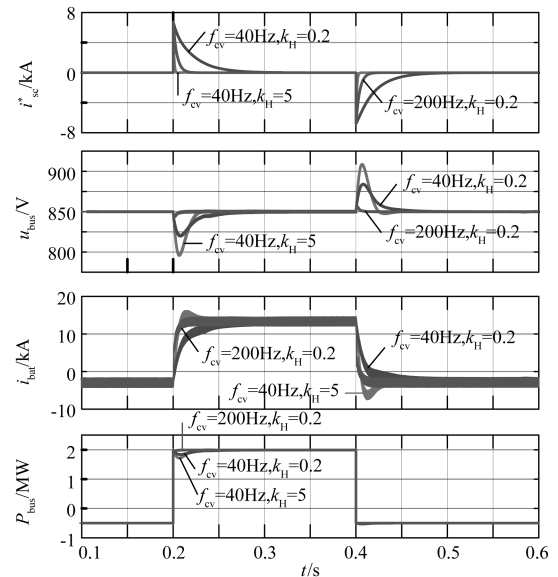


图 9 不同 f_{cv} 和 k_H 值的仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms of different f_{cv} and k_H

同时,加快了扰动恢复速度,有效提高了系统的抗干扰能力。

4 实验验证

为了验证上述理论分析的正确性,搭建 HESS 实验平台,如图 10 所示。其中,直流母线电压设定为 220V;轻载 300W,重载 800W;蓄电池组为 72V、50A·h;由于实验只有一个容量固定的超级电容组,其容值 3.3F,耐压 220V,没有对不同超级电容进行实验验证,但其理论正确性已通过仿真进行验证。

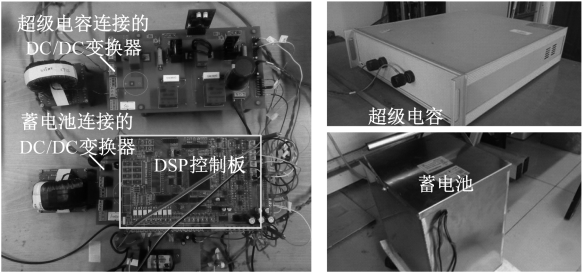


图 10 HESS 实验平台
Fig.10 HESS experimental platform

图 11 为采用单一蓄电池储能系统负载突加时直流母线电压和蓄电池电流的实验波形,其中,控制参数为 $f_{cv} = 40\text{Hz}$ 。图 11 表明,由于蓄电池控制响应速度慢,负载突加时由母线电容提供所需负载高频功率,造成母线电压有较大的电压跌落。直流母线波动电压响应为二阶系统,导致蓄电池电流动态响应有超调。

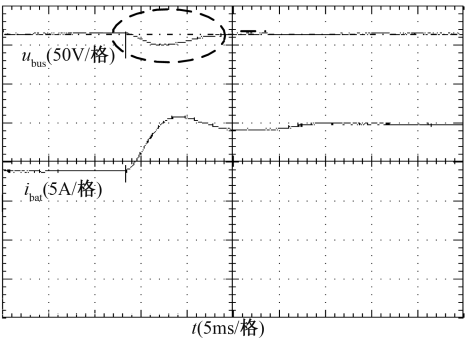


图 11 采用单一蓄电池储能系统时的实验波形
Fig.11 Experiment waveforms adopting single battery energy storage system

图 12 为采用 HESS 负载突加时直流母线电压、蓄电池电流和超级电容电流的实验波形,其中,控制参数为 $f_{cv} = 40\text{Hz}$ 和 $k_H = 5$ 。图 12 表明,超级电容

储能系统作用比例小,对直流母线响应性能影响较小。与直流母线电压环路相比,超级电容功率环路为快环,负载突加时超级电容电流响应快,快速衰减为零,只能为系统提供小部分能量,从而会导致直流母线电压幅值有较大的跌落。

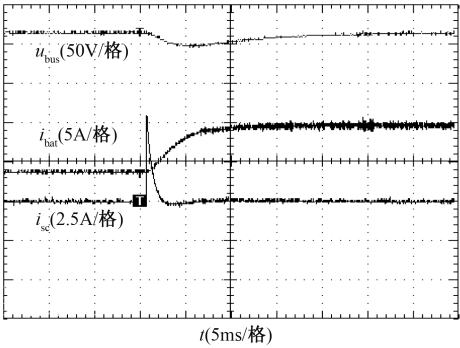


图 12 $f_{cv} = 40\text{Hz}, k_H = 5$ 时 HESS 实验波形
Fig.12 Experiment waveforms adopting HESS when $f_{cv} = 40\text{Hz}, k_H = 5$

图 13 为采用 HESS 时负载突加时直流母线电压、蓄电池电流和超级电容电流波形,其中,控制参数为 $f_{cv} = 40\text{Hz}$ 和 $k_H = 0.2$ 。图 13 表明,超级电容储能系统在过渡过程中起主导作用,负载突加时由超级电容储能系统提供所需负载高频功率来抑制直流母线电压波动。与图 12 对比可知,直流电压跌落明显减小,但是恢复时间 t_v 变长。 $k_H = 0.2$ 时,系统恢复时间 t_v 由指数衰减项决定, $t_v \approx 3/(k_H \omega_{cv}) = 40\text{ms}$; 而 $k_H = 5$ 时,系统恢复时间由二阶衰减振荡环节决定, $t_v \approx 6/\omega_{cv} = 24\text{ms}$ 。

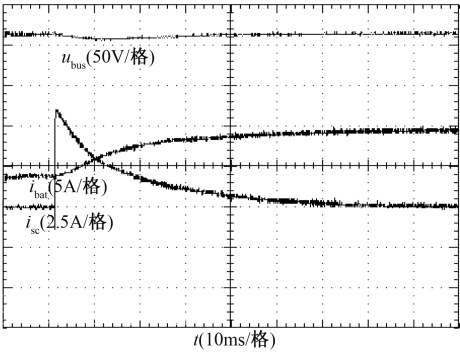


图 13 $f_{cv} = 40\text{Hz}, k_H = 0.2$ 时 HESS 实验波形
Fig.13 Experiment waveforms adopting HESS when $f_{cv} = 40\text{Hz}, k_H = 0.2$

图 14 为采用 HESS 时直流母线电压、蓄电池电流和超级电容电流波形,其中,控制参数为 $f_{cv} = 200\text{Hz}$ 和 $k_H = 0.2$ 。图 14 表明,增大 f_{cv} 值,在减小

电压跌落的同时,减小恢复时间,从而实现了抗扰性能的综合优化。

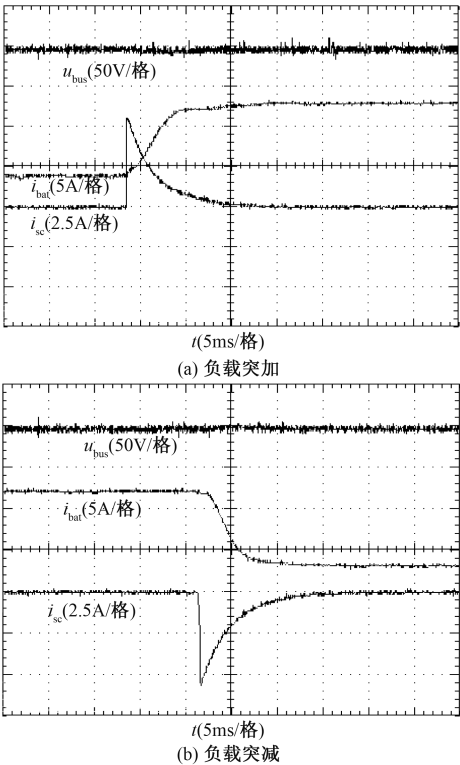


图 14 $f_{cv} = 200\text{Hz}, k_H = 0.2$ 时 HESS 实验波形
Fig.14 Experiment waveforms adopting HESS
when $f_{cv} = 200\text{Hz}, k_H = 0.2$

5 结 论

针对蓄电池-超级电容混合储能系统,通过分析电压外环开环剪切频率 ω_{cv} 和系数 k_H 对混合储能系统抗干扰性能和超级电容容量的影响,得出如下结论:

- (1) 按最大剪切频率 $f_{cv\max}$ 设计电压外环以达到整体优化系统性能和降低成本的目的。
- (2) 为保证超级电容储能系统得到充分利用从而有效抑制直流母线电压波动,高通滤波器系数 k_H 的约束条件为 $k_H \leq 0.5$ 。根据系统不同目标要求, k_H 选择依据为:以减小成本为主要目标时,保证直流母线波动电压在允许范围内,取 k_H 可达到的最大值;以提高动态抗干扰性能为主要目标时, k_H 取值由系统直流母线电压性能要求决定。
- (3) 通过 2MW 储能系统仿真模型和小功率实验平台的结果验证了理论分析的正确性和可行性。

参考文献 (References):

[1] 吴杰, 温晨阳, 李珊, 等 (Wu Jie, Wen Chenyang, Li Shan, et al.). 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置 (Optimal allocation of PV and accumulator system based on time-of-use price) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 23-30.

[2] 王芳, 罗胜华, 吴海辉 (Wang Fang, Luo Shenghua, Wu Haihui). 基于混合储能的新型双向 DC/DC 变换器控制研究 (Research on new bidirectional DC/DC converter control based on hybrid energy storage) [J]. 电气传动 (Electric Drive), 2019, 49 (4): 48-53.

[3] Manandhar U, Tummuru N R, Kumar S, et al. Validation of faster joint control strategy for battery and supercapacitor based energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 64 (4): 3286-3295.

[4] 杜少飞, 谢文超, 朱永强, 等 (Du Shaofei, Xie Wenchao, Zhu Yongqiang, et al.). 并网型直流微电网主动协调控制方法研究 (Research on active coordination control method for grid-connected DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (6): 30-38.

[5] 曾进辉, 张伯伦, 雷敏, 等 (Zeng Jinhui, Zhang Bolun, Lei Min, et al.). 光伏-混合储能直流微电网能效提升策略研究 (Research on energy efficiency improvement strategies of photovoltaic-hybrid energy storage DC microgrid) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2019, 53 (3): 78-81.

[6] Lu Xiaoying, Chen Yaojiang, Fu Minfan, et al. Multi-objective optimization based real-time control strategy for battery/ultracapacitor hybrid energy management systems [J]. IEEE Access, 2019, 7: 11640-11650.

[7] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺 (Liu Shilin, Wen Jinyu, Sun Haishun). 适用于风电功率调控的复合储能系统及其控制策略 (Hybrid energy storage system and its control strategies intended for wind power conditioning) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (1): 95-102.

[8] Kollimalla S K, Mishra M K, Narasamma N L. Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 (4): 1137-1142.

[9] Kollimalla S K, Mishra M K, Ukil A, et al. DC grid voltage regulation using new HESS control strategy [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8 (2): 772-880.

- [10] Xu Qianwen, Xiao Jianfang, Wang Peng, et al. A decentralized control strategy for autonomous transient power sharing and state-of-charge recovery in hybrid energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8 (4): 1443-1450.
- [11] 张纯江, 董杰, 刘君, 等 (Zhang Chunjiang, Dong Jie, Liu Jun, et al.). 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略 (A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (4): 334-340.
- [12] Nishad Mendis, Kashem M Muttaqi, Sarath Perera. Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (2): 944-949.

Performance optimization of battery-ultracapacitor hybrid energy storage system

CHAI Xiu-hui¹, ZHANG Chun-jiang¹, CHAI Jian-guo², LI Yan², GANG Lei¹

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Institute of Tianjin Aerospace Mechanical and Electrical Equipment, Tianjin 300457, China)

Abstract: The uncertainty of wind and solar energy and the sudden change of load power will cause the fluctuation of DC bus voltage, which will affect the power quality of power converter connected to DC bus. Hybrid energy storage system (HESS) is equipped to improve DC bus voltage performance and ensure system power balance. For the battery-ultracapacitor HESS, the control strategy that the battery energy storage system stabilizes the DC bus voltage while the supercapacitor energy storage system adopts the single-current loop control strategy based on high-pass filter is considered as the research object in this paper. HESS control model is established, and the time-domain expressions of DC bus fluctuations voltage under load disturbance is deduced. Based on the time-domain expressions, the influence of the voltage outer loop open-loop shear frequency ω_{cv} and the ratio k_H of high-pass filter transition frequency ω_0 to ω_{cv} on the HESS anti-jamming performance and ultracapacitor capacity is analyzed in detail, and the design method of HESS control parameters is obtained. The voltage outer loop is designed according to the maximum shear frequency f_{cvmax} to optimize the system performance and reduce the cost. The constraint of k_H is $k_H \leq 0.5$, and the selection basis of k_H under different targets is given. Through the design of HESS control parameters, DC bus voltage fluctuation can be effectively suppressed and the system performance can be optimized. Finally, the correctness and feasibility of the theoretical analysis are verified by the results of the 2MW energy storage system simulation model and low power experimental platform.

Key words: hybrid energy storage system; performance optimization; anti-jamming performance; battery; supercapacitor