

# 基于混合储能的直流母线电压有限时间 无源控制方法

杨 帆<sup>1</sup>, 田 雷<sup>1</sup>, 李 浩<sup>2</sup>, 李东东<sup>1</sup>, 林顺富<sup>1</sup>

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 中国船舶重工集团公司第704研究所, 上海 200031)

**摘 要:** 为提高直流微网中母线电压稳定速度, 增强抗干扰性, 结合有限时间控制理论和无源控制理论, 提出一种新的基于混合储能直流母线电压有限时间无源控制方法。针对无源控制中渐近收敛问题, 运用有限时间控制理论, 引入最终吸引子, 改进渐近收敛性能为有限时间收敛; 基于混合储能系统数学模型, 设计混合储能系统的有限时间无源控制器; 以独立光伏发电系统为例, 搭建系统仿真平台, 同时为了对比控制性能, 给出混合储能系统的无源控制器。仿真结果表明, 所提出的方法使直流母线电压在光照强度、负荷变化的情况下具有更快的收敛性能和更强的抗干扰性。

**关键词:** 有限时间无源控制; 无源控制; 混合储能系统; 收敛性能; 抗干扰性

**中图分类号:** TM71

**文献标识码:** A

## 0 引 言

在直流微网中, 光伏、风力发电因受环境和气候的影响, 其输出功率具有不稳定性及不可预测性, 因此需配备一定容量的储能装置, 以保证供电的持续性和可靠性。储能装置常采用蓄电池和超级电容的混合储能形式来提高储能系统的性能, 并通过双向 DC-DC 变换器并联到直流母线上<sup>[1]</sup>。因双向 DC-DC 变换器具有非线性时变结构, 工业上常用的线性 PID (proportion integral derivative) 控制方法已很难达到期望的控制要求<sup>[2]</sup>。因此, 有必要研究非线性控制方法来提高混合储能系统的控制性能。

目前, 应用在储能系统的非线性控制方法有滑模控制<sup>[3]</sup>、无源控制<sup>[4]</sup>和自适应控制<sup>[5]</sup>等。文献[3]运用滑模控制方法控制直流微网中锂电池储能系统, 提高了输出侧直流母线电压的调节速度; 文献[4]将无源控制方法应用在直流微网中的超级电容和燃料电池混合功率源中, 可增强系统的稳定性能; 文献[5]提出一种超级电容和蓄电池混合储能系统

的功率自适应控制策略, 满足了孤岛运行时的电能质量要求和负荷功率需求。然而, 通过上述的非线性方法构造的闭环反馈系统均满足利普希茨连续性质的情况, 因而只能保证闭环系统的渐近稳定性, 无法获得更优的收敛性能<sup>[6]</sup>。从收敛的角度上看, 更希望看到控制目标在有限时间内收敛到其参考值。如在实际应用中, 希望控制直流微网中的储能系统充放电, 使输出端直流母线电压能够在有限时间内达到稳定值, 这样做不仅可提高供电系统的稳定性能, 也提高了输出电压的电能质量, 减少对负荷的危害。近年来, 有限时间控制作为一种新的非线性控制手段, 它不仅可以保证构造的闭环系统能够在有限时间内稳定, 而且使得控制系统在存在扰动情况下具有更强的抗扰动性能<sup>[7]</sup>, 这种控制方法所具有的优点已得到了理论界和应用界的广泛关注<sup>[8,9]</sup>。文献[8]在 Buck 变换器输出电压滑模控制中, 在原有的线性滑模面中引入分数幂, 通过这种带分数幂的非线性滑模面设计滑模控制器使得 Buck 变换器输出电压能够在有限时间内稳定, 收敛速度明显提高。文献[9]对永磁同步电机矢量控

收稿日期: 2016-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(51407114); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900); 上海市科委部分地方院校能力建设计划项目(17020500800)

通信作者: 杨 帆(1981—), 女, 博士、副教授, 主要从事线性控制与优化技术在电力电子中的应用、新能源分布式发电系统控制与并网运行等方面的研究。smartgridcontrol@163.com

制,提出一种基于扰动观测器的有限时间控制方法,该方法在速度环控制中引入分数幂,与传统的PI控制相比,抗扰动性增强。

为提高直流微网中直流母线电压收敛速度,结合无源控制理论和有限时间控制方法,本文提出一种基于混合储能的直流母线电压有限时无源控制方法。首先,针对无源控制中的渐近收敛问题,运用有限时间控制理论,构造一种新的带有分数幂的李雅普诺夫能量函数;其次,基于混合储能系统数学模型,运用有限时无源控制方法,推出混合储能系统有限时无源控制器;最后,以独立光伏发电系统为例,搭建系统仿真模型,同时为对比控制性能,给出混合储能系统的无源控制器。仿真结果表明,与无源控制相比,所提出的方法使直流母线电压在光照强度、负荷变化的情况下具有更快的收敛速度和更强的抗干扰性。

## 1 独立直流微网数学模型

图1为典型独立直流微网系统结构图,包括可再生能源如光伏风力发电、蓄电池与超级电容混合储能系统、电力电子变换器、直流母线以及负荷。图中, $T_1 \sim T_4$ 为开关, $L_{sc}$ 、 $L_b$ 分别为超级电容和蓄电池的电感。其中,蓄电池和超级电容均通过双向DC-DC变换器并联在直流母线侧,实现了混合储能系统与直流母线之间的能量双向流动。因可再生能源输出功率、负荷消耗功率的变化,直流母线电压会

发生波动,需要控制混合储能系统充放电来平抑电压波动。

用电流  $i_{bus}$  来综合替代可再生能源输出电流  $i_{res}$  与负荷电流  $i_{load}$  变化,运用基尔霍夫电路定律和状态空间模型法,推导超级电容和蓄电池混合储能系统数学模型,如式(1)~式(4)所示:

$$L_b \frac{di_b}{dt} = V_b - (1 - \alpha_1)V_c \quad (1)$$

$$L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = V_{sc} - (1 - \alpha_3)V_c \quad (2)$$

$$C_{sc} \frac{dV_{sc}}{dt} = -i_{sc} \quad (3)$$

$$C \frac{dV_c}{dt} = -i_{bus} + (1 - \alpha_3)i_{sc} + (1 - \alpha_1)i_b \quad (4)$$

式中,  $i_{bus} = i_{load} - i_{res}$ , 其中  $i_{load}$  为负载侧输出电流;  $i_{res}$  为可再生能源注入电流;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_3$  ——  $T_1$  与  $T_3$  的占空比;  $C$  ——直流母线电容容值;  $C_{sc}$  ——超级电容的等效电容容值;  $i_b$ 、 $i_{sc}$  ——变换器中的电感电流;  $V_{sc}$ 、 $V_b$ 、 $V_c$  ——超级电容电压、蓄电池电压、直流母线电压。

式(1)为运用基尔霍夫电路定律对蓄电池充放电系统列写的基尔霍夫电压方程;式(2)为超级电容充放电系统的基尔霍夫电压方程;式(3)为超级电容自身的充放电方程;式(4)为母线电压的基尔霍夫电流方程。连接混合储能系统和直流母线的双向DC-DC变换器的数学模型推导详见文献[4]。

## 2 一种新的有限时无源控制方法

### 2.1 无源控制及其渐近收敛性

无源控制(passivity based control, PBC)就是从系统的能量入手,寻求与被控制物理量相关的能量存储函数,按照该理论设计的无源控制器可使能量存储函数按期望的能量存储函数分布,从而达到控制目的。在一些实际应用中,常采用互联和阻尼分配无源控制(interconnection and damping assignment passivity-based control, IDA-PBC)方法进行控制器设计<sup>[10]</sup>。

设非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}' = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases}, \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{y} \in \mathbf{R}^n \quad (5)$$

IDA-PBC的控制思想是针对如式(5)所示的系统(5)构造闭环反馈使闭环系统方程为:

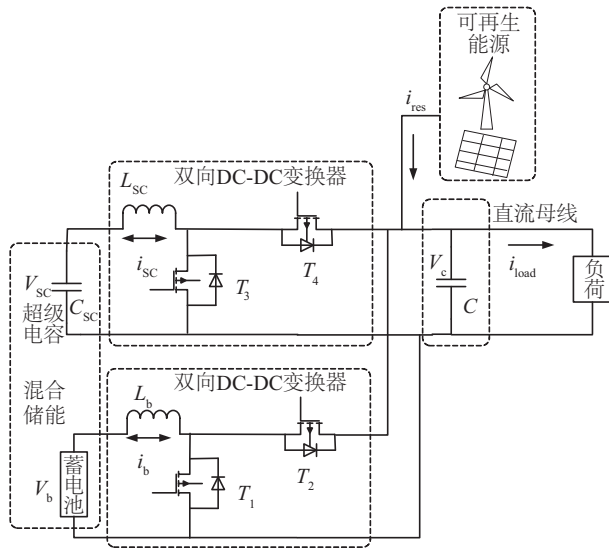


图1 独立直流微网结构

Fig. 1 Structure of stand-alone DC microgrid

$$\mathbf{x}' = [\mathbf{J}(x) - \mathbf{J}(x)] \frac{\partial H^T(x)}{\partial x} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{x}$  ——  $n$  维状态矢量,  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$ ;  $\mathbf{J}(x)$  ——  $n \times n$  反对称矩阵,  $\mathbf{J}(x) = -\mathbf{J}^T(x)$ ;  $\mathbf{R}(x)$  ——  $n \times n$  半正定矩阵,  $\mathbf{R}(x) = \mathbf{R}^T(x) \geq 0$ ;  $H(x)$  —— 表征闭环系统且与被控物理量相关的能量函数, 通常该能量函数选取为自然能量函数, 其形式为  $H(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} k_i x_i^2$ , 其中  $i = 1, \cdots, n$ ,  $n$  为系统维数,  $k_i > 0$ 。

该闭环系统能量函数  $H(x)$  随时间导数:

$$\begin{aligned} \frac{dH(x)}{dt} &= \frac{\partial H(x)}{\partial x} \mathbf{x}' \\ &= \frac{\partial H(x)}{\partial x} [\mathbf{J}(x) - \mathbf{R}(x)] \frac{\partial H^T(x)}{\partial x} \\ &= \frac{\partial H(x)}{\partial x} \mathbf{J}(x) \frac{\partial H^T(x)}{\partial x} - \frac{\partial H(x)}{\partial x} \mathbf{R}(x) \frac{\partial H^T(x)}{\partial x} \end{aligned} \quad (7)$$

因  $\mathbf{J}(x)$  为反对称矩阵,  $\mathbf{R}(x)$  为半正定矩阵, 故  $\frac{dH(x)}{dt} = -\frac{\partial H(x)}{\partial x} \mathbf{R}(x) \frac{\partial H^T(x)}{\partial x} \leq 0$ , 所构造的闭环系统(6)具有无源特性, 即依据李雅普诺夫稳定性理论, 该系统是渐进稳定的。

根据上述控制思想, 确定所选取的与被控物理量相关的能量函数  $H(x)$  以及反对称矩阵  $\mathbf{J}(x)$  和半正定矩阵  $\mathbf{R}(x)$ , 所构造的闭环反馈控制律  $u$  可通过等式(8)表示:

$$f(x) + g(x)u = [\mathbf{J}(x) - \mathbf{R}(x)] \frac{\partial H^T(x)}{\partial x} \quad (8)$$

求出通过该等式构造的控制律  $u$  可使等式左边的系统函数按照等式右边的具有无源特性能量存储函数分布, 从而达到控制目的。

图 1 中独立直流微网系统的稳定运行, 其控制目标为稳定直流母线电压  $V_c$  和超级电容电压  $V_{sc}$ , 那么可选取与直流母线电压误差  $\Delta V_c$  和超级电容电压误差  $\Delta V_{sc}$  相关的能量函数  $H_1(x) = \frac{1}{2} C \Delta V_c^2 + \frac{1}{2} C_{sc} \Delta V_{sc}^2$ , 那么通过等式(8)推出控制律  $u$  可使  $\Delta V_c$  与  $\Delta V_{sc}$  渐近收敛到 0 V, 达到稳定电压的目的。

## 2.2 一种新的有限时无源控制方法

上述 PBC 方法使控制目标渐近收敛, 从收敛时间优化上看, 有限时间收敛才是最优的收敛形式。受神经网络中最终吸引子概念启发<sup>[11]</sup>, 本文提出一种新的有限时无源控制方法(finite-time passivity based control, FT-PBC), 该方法在选取的能量函数时, 引入分数幂  $\lambda$ , 使如式(6)所示的系统(6)中的  $H(x)$  其具有以下形式:

$$H(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{1+\lambda} k_i x_i^{1+\lambda} \quad (9)$$

式中,  $i = 1, \cdots, n$ ,  $n$  为系统维数,  $k_i > 0$ , 分数幂  $\lambda$  满足  $0 < \lambda < 1$ 。那么, 系统(6)有限时间稳定。

在式(8)中, 由于等式左边的系统函数是按照等式右边的具有无源特性能量存储函数分布的, 在 FT-PBC 控制下, 将式(8)中能量函数选为一种带有分数幂的特殊能量函数, 即式(9)时, 则会具有一些优越的稳定性能。

### 2.2.1 FT-PBC 与 PBC 控制的收敛速度对比分析

以独立直流微网为例, 选取能量函数  $H(x)$  为:

$$H(x) = \frac{1}{1+\lambda} C \Delta V_c^{1+\lambda} + \frac{1}{1+\lambda} C_{sc} \Delta V_{sc}^{1+\lambda} \quad (10)$$

式中,  $\lambda$  —— 分数幂, 其范围为  $0 < \lambda < 1$ 。

运用李雅普诺夫稳定性理论, 对如式(10)所示的能量函数(10)求时间导数, 根据式(7)得:

$$\frac{dH(x)}{dt} = -\frac{\partial H(x)}{\partial x} \mathbf{R}(x) \frac{\partial^T H(x)}{\partial x} \quad (10)$$

令  $\mathbf{R}(x) = \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} > 0$ , 将式(10)及  $\mathbf{R}(x)$  带入得:

$$\begin{aligned} \frac{dH(x)}{dt} &= -[C \Delta V_c^\lambda \quad C_{sc} \Delta V_{sc}^\lambda] \times \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C \Delta V_c^\lambda \\ C_{sc} \Delta V_{sc}^\lambda \end{bmatrix} \\ &= -(r_1 C^2 \Delta V_c^{2\lambda} + r_2 C_{sc}^2 \Delta V_{sc}^{2\lambda}) \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $r_1$ 、 $r_2$  大于等于零。

而选取能量函数  $H_1(x) = \frac{1}{2} C \Delta V_c^2 + \frac{1}{2} C_{sc} \Delta V_{sc}^2$  时,

其时间导数为:

$$\begin{aligned} \frac{dH_1(x)}{dt} &= -[C \Delta V_c \quad C_{sc} \Delta V_{sc}] \times \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C \Delta V_c \\ C_{sc} \Delta V_{sc} \end{bmatrix} \\ &= -(r_1 C^2 \Delta V_c^2 + r_2 C_{sc}^2 \Delta V_{sc}^2) \end{aligned} \quad (12)$$

比较式(11)和式(12), 当  $|\Delta V_c| < 1$ ,  $|\Delta V_{sc}| < 1$ , 因分数幂  $0 < \lambda < 1$ , 则  $\Delta V_c^{2\lambda} > \Delta V_c^2$ ,  $\Delta V_{sc}^{2\lambda} > \Delta V_{sc}^2$ ,

满足  $\left| \frac{dH(x)}{dt} \right| > \left| \frac{dH_1(x)}{dt} \right|$ 。

即在平衡点附近一小邻域内, 相比于 PBC 控制, FT-PBC 控制具有更快的稳定速度。

### 2.2.2 FT-PBC 的有限时间收敛性

引理 1<sup>[12,13]</sup> 考虑系统(如式(6)所示)假设存在一个定义在邻域  $0 \in U \subseteq D \subseteq \mathbf{R}^n$  上的连续可微的函数  $V(x)$  和实数  $c > 0$ ,  $0 < \alpha < 1$ , 满足在  $U$  上,  $V(x)$  正定,  $V'(x) + cV^\alpha(x)$  负半定, 则系统(6)的平衡点  $x=0$  为有限时间稳定。

Jensen's 不等式<sup>[14]</sup> 对于  $x_i \in \mathbf{R}$ ,  $i=1, \dots, n$ , 不等式, 即式(13)成立:

$$\left( \sum_{i=1}^n |x_i|^{\alpha_2} \right)^{\frac{1}{\alpha_2}} \leq \left( \sum_{i=1}^n |x_i|^{\alpha_1} \right)^{\frac{1}{\alpha_1}}, \quad 0 < \alpha_1 \leq \alpha_2 \quad (13)$$

特别地, 当  $\alpha_1 = p$ ,  $\alpha_2 = 1$  时, 得到:

$$\left( \sum_{i=1}^n |x_i| \right)^p \leq \sum_{i=1}^n |x_i|^p, \quad 0 < p \leq 1 \quad (14)$$

由等式(11)得:

$$\begin{aligned} \frac{dH(x)}{dt} = & -(r_1 C^2 \Delta V_c^{2\lambda} + r_2 C_{sc}^2 \Delta V_{sc}^{2\lambda}) \leq \\ & -r_{\min} (C^2 \Delta V_c^{2\lambda} + C_{sc}^2 \Delta V_{sc}^{2\lambda}) \leq \\ & -r_{\min} \cdot k_{\min}^{\frac{2}{1+\lambda}} \cdot \sum_{i=1}^2 (k_i \cdot x_i^{1+\lambda})^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $r_{\min} = \min[r_1, r_2]$ ;  $x_i = [\Delta V_c, \Delta V_{sc}]$ ,  $k_{\min} = \min[k_1, k_2] = \min[C, C_{sc}]$ 。

由于  $0 < \lambda < 1$ , 因此  $0 < \frac{2\lambda}{1+\lambda} < 1$ , 根据 Jensen's 不等式可知:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (k_i \cdot x_i^{1+\lambda})^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}} & \geq \left( \sum_{i=1}^n k_i \cdot x_i^{1+\lambda} \right)^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}} \\ & = \left[ (1+\lambda) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{1+\lambda} \cdot k_i \cdot x_i^{1+\lambda} \right]^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}} \\ & = (1+\lambda)^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}} \cdot H^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}}(x) \end{aligned} \quad (16)$$

则有:

$$\begin{aligned} \frac{dH(x)}{dt} & \leq -r_{\min} \cdot k_{\min}^{\frac{2}{1+\lambda}} \cdot (1+\lambda)^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}} \cdot H^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}}(x) \\ & = -\beta H^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}}(x) \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $\beta = r_{\min} \cdot k_{\min}^{\frac{2}{1+\lambda}} \cdot (1+\lambda)^{\frac{2\lambda}{1+\lambda}}$ 。

由于  $0 < \frac{2\lambda}{1+\lambda} < 1$ , 由引理 1 可知, 系统(6)为有限时间内稳定。

因系统(6)是有限时间稳定的, 则通过等式(8)构造的控制律  $u$  可使  $\Delta V_c$  与  $\Delta V_{sc}$  在有限时间内收敛到零, 相比于 PBC 控制的渐近收敛, FT-PBC 控制具有有限时间稳定性能。

## 3 混合储能系统 FT-PBC 设计

在混合储能系统中, 超级电容具有功率密度大这一特点, 可快速充放电平抑直流母线电压波动, 但其能量密度低, 不能长时间维持母线电压稳定, 其本身电压也不能长期维持在额定值, 而蓄电池具有能量密度大的特点, 可使直流微网的功率长期处于平衡状态且能维持超级电容电压稳定。因此, 通过控制混合储能系统充放电, 稳定直流母线与超级电容的电压, 使独立直流微网处于稳定运行状态。

为使直流母线与超级电容的电压快速稳定, 采用 FT-PBC 方法控制混合储能系统充放电; 同时为了能够清晰描述混合储能系统有限时间无源控制结构, 采用分层的控制方式:

1) 功率控制层: 运用 FT-PBC 算法, 生成超级电容和蓄电池充放电电流参考值, 确定混合储能系统充放电参考功率;

2) 自动控制层: 采用滑模控制 (sliding mode control, SMC) 理论中的指数趋近律控制方法, 生成控制律使超级电容和蓄电池充放电电流能够快速的跟踪功率控制层生成的电流参考值;

3) 开关控制层: 运用脉宽调制技术 (pulse width modulation, PWM), 将自动控制层生成控制律转化为变换器开关的控制信号。

### 3.1 功率控制层设计

为提高混合储能系统的控制性能, 应设置自动控制层的调节速度足够快, 使其控制的充放电电流能够快速跟踪电流参考值。因此, 可将  $i_b = i_b^*$ ,  $i_{sc} = i_{sc}^*$  代入式(1)~式(4)中, 将混合储能系统数学模型简化为:

$$\frac{d\Delta V_c}{dt} = \frac{1}{C} (-i_{bus} + \frac{V_{sc}}{V_c} i_{sc}^* + \frac{V_b}{V_c} i_b^*) \quad (18)$$

$$\frac{d\Delta V_{sc}}{dt} = \frac{1}{C_{sc}} (-i_{sc}^*) \quad (19)$$

式中,  $\Delta V_c$ ——母线实际电压与期望电压之间的偏差,  $\Delta V_c = V_c - V_c^*$ ,  $V_c^*$  为母线期望电压值;  $\Delta V_{sc}$ ——超级电容实际电压与期望电压之间的偏差,  $\Delta V_{sc} = V_{sc} - V_{sc}^*$ ,  $V_{sc}^*$  为超级电容期望电压值;  $i_b^*$ 、 $i_{sc}^*$ ——蓄电池和超级电容电流参考值。

式(18)、式(19)为混合储能系统的误差状态方



程。按照 FT-PBC 设计方法,选取具有式(10)能量函数,再结合式(18)、式(19)及能量函数式(10),可以

以通过  $f(x)+g(x)u=[J(x)-R(x)]\frac{\partial H^T(x)}{\partial x}$  导出:

$$\frac{1}{C}(-i_{bus} + \frac{V_{sc}}{V_c}i_{sc}^* + \frac{V_b}{V_c}i_b^*) = -r_1 C \Delta V_c^\lambda - j C_{sc} \Delta V_{sc}^\lambda \quad (20)$$

$$\frac{1}{C_{sc}}(-i_{sc}^*) = j C \Delta V_c^\lambda - r_2 C_{sc} \Delta V_{sc}^\lambda \quad (21)$$

式中,  $x = \begin{bmatrix} \Delta V_c \\ \Delta V_{sc} \end{bmatrix}$ ; 互联矩阵  $J = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}$ ; 阻尼矩阵

$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$ ;  $\frac{\partial H^T(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} C \Delta V_c^\lambda \\ C_{sc} \Delta V_{sc}^\lambda \end{bmatrix}$ ;  $j$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ ——控制

器参数。

由式(20)及式(21)可推出蓄电池与超级电容充放电电流参考值为:

$$i_b^* = \frac{V_c}{V_b}i_{bus} - (\frac{V_{sc}}{V_b}r_2 C_{sc}^2 + \frac{V_c}{V_b}j C C_{sc}) \Delta V_{sc}^\lambda + \frac{V_{sc}}{V_b}(j C C_{sc} - \frac{V_c}{V_b}r_1 C^2) \Delta V_c^\lambda \quad (22)$$

$$i_{sc}^* = r_2 C_{sc}^2 \Delta V_{sc}^\lambda - j C C_{sc} \Delta V_c^\lambda \quad (23)$$

由式(22)知,当  $\Delta V_{sc}=0$ ,  $\Delta V_c=0$  时,  $i_b^* = \frac{V_c}{V_b}i_{bus}$ , 蓄电池提供功率输出端和负荷端的差额功率;当  $\Delta V_{sc} \neq 0$ ,  $\Delta V_c \neq 0$  时,蓄电池不仅提供差

额功率,而且还起到调节母线电压和超级电容电压作用,但由于实际中蓄电池充放电电流受到限制,短时间内蓄电池对调节母线电压误差效果不明显,因而可将其仅用于调节超级电容电压;同时,超级电容功率密度高,短时间内调节母线电压效果明显。因此在式(22)中,令  $j C C_{sc} - \frac{V_c}{V_b}r_1 C^2 = 0$ , 式(23)中的  $r_2 = 0$ , 那么控制律,即式(22)、式(23)可被简化为:

$$i_b^* = \frac{V_c}{V_b}(i_{bus} - \alpha \Delta V_{sc}^\lambda) \quad (24)$$

$$i_{sc}^* = -\alpha \Delta V_c^\lambda \quad (25)$$

式中,  $\alpha = j C C_{sc} > 0$ 。

### 3.2 自动控制层设计

混合储能系统控制结构图见图2。为确保混合储能系统的控制性能,应使自动控制层的调节速度足够快。因此可将 SMC 运用在响应速度更快的自动控制层当中<sup>[15]</sup>。运用 SMC 中的指数趋近律方法<sup>[16]</sup>,选取滑模面  $S = i - i^*$ ,令  $S' = -kS - q \text{sign}(S)$ ,得:

$$\frac{di}{dt} = -kS - q \text{sign}(S) \quad (26)$$

式中,  $i = \begin{bmatrix} i_b \\ i_{sc} \end{bmatrix}$ ;  $i^* = \begin{bmatrix} i_b^* \\ i_{sc}^* \end{bmatrix}$ ;  $k$ 、 $q$ ——控制器参数。

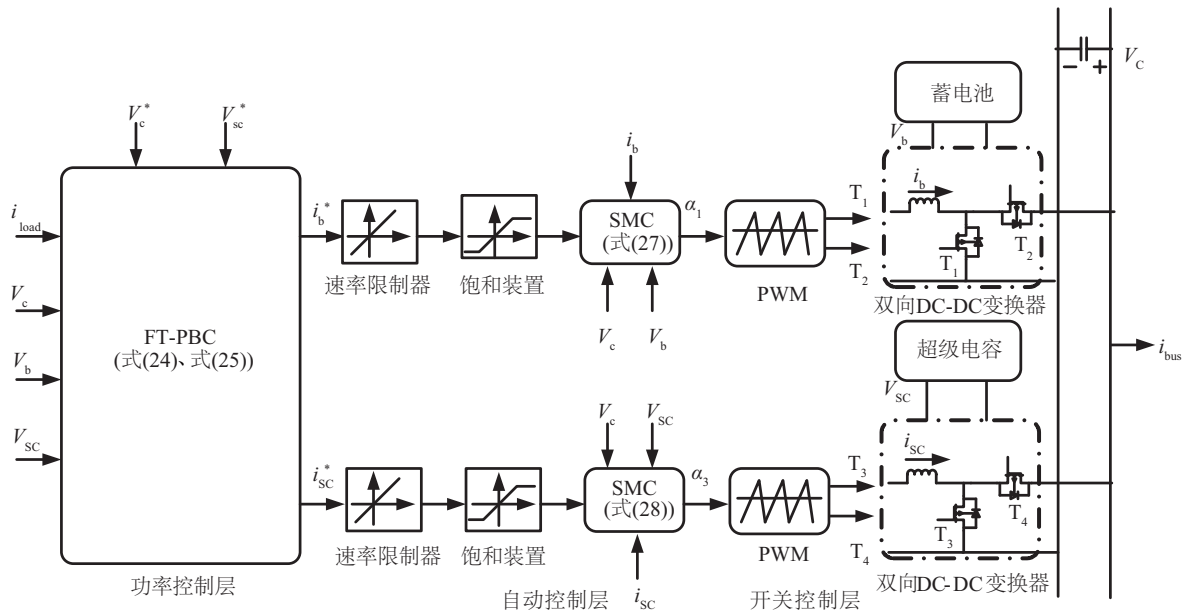


图2 混合储能系统有限时间无源控制结构图

Fig. 2 Structure of FT-PBC of HESS

将式(1)、式(2)代入式(26)得控制律为:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{V_b + k_1 L_b (\dot{i}_b - i_b^*) + q_1 L_b \text{sign}(\dot{i}_b - i_b^*)}{V_c} \quad (27)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{V_{sc} + k_2 L_{sc} (\dot{i}_{sc} - i_{sc}^*) + q_2 L_{sc} \text{sign}(\dot{i}_{sc} - i_{sc}^*)}{V_c} \quad (28)$$

式中,  $k_1$ 、 $q_1$ 、 $k_2$ 、 $q_2$ ——滑模控制器参数。

自动控制层产生的变换器控制信号  $\alpha_1$ 、 $\alpha_3$  使混合储能系统充放电电流  $i_b$ 、 $i_{sc}$  快速跟踪到电流参考值  $i_b^*$ 、 $i_{sc}^*$ , 该信号需经 PWM 调制转换为互补的开关控制信号  $T_1$  和  $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$ 。

## 4 仿真与分析

### 4.1 仿真参数及设计

为了验证所提出控制策略的有效性, 建立独立光伏发电系统的仿真模型, 所采用的光伏电池模型及其 MPPT 控制见文献[17]。系统仿真参数为: 直流母线: 等效电容  $C=4 \text{ mF}$ , 母线额定电压为  $350 \text{ V}$ ; 混合储能系统: 蓄电池额定电压为  $70 \text{ V}$ , 额定容量为  $200 \text{ Ah}$ , 充放电电流幅值限制为  $\pm 100 \text{ A}$ , 初始  $\text{SOC}=70\%$ , 超级电容额定容值为  $1 \text{ F}$ , 额定电压为  $200 \text{ V}$ ; 光伏阵列: 单体光伏电池开路电压  $44.2 \text{ V}$ , 短路电流  $5.2 \text{ A}$ , 最大功率点电压为  $35.2 \text{ V}$ , 最大功率点电流  $4.95 \text{ A}$ , 最大输出功率为  $176 \text{ W}$ , 光伏电池串联个数为  $17$ , 发电功率为  $3 \text{ kW}$ ; 变换器: 电感  $L_{sc}=200 \text{ } \mu\text{H}$ ,  $L_b=1 \text{ mH}$ , IGBT 频率为  $10 \text{ kHz}$ ; 功率控制层:  $\alpha=16$ ,  $\lambda=0.4$ ; 自动控制层:  $k_1=k_2=5000$ ,  $q_1=q_2=0.01$ 。

为对比所提出方法的控制性能, 以 PBC 作为参照, 其中, PBC 相关公式为: 所选的能量函数为  $H_1(x) = \frac{1}{2} C \Delta V_c^2 + \frac{1}{2} C_{sc} \Delta V_{sc}^2$ , 由此导出的参考电流值为  $i_{b1}^* = \frac{V_c}{V_b} (i_{bus} - \alpha_1 \Delta V_{sc})$ ,  $i_{sc1}^* = -\alpha_1 \Delta V_c$ , 其中  $\alpha_1=16$ 。

设置 2 种扰动变化(图 3 和图 4): 在  $0.4 \text{ s}$  处负荷变化由  $3 \text{ kW}$  跃变为  $4.75 \text{ kW}$ ; 在  $0.6 \text{ s}$  处光照强度由  $1000 \text{ W/m}^2$  跃变为  $600 \text{ W/m}^2$ , 光伏阵列输出功率由  $3 \text{ kW}$  下降为  $1.15 \text{ kW}$ 。

### 4.2 仿真分析

图 5 为  $0.4 \text{ s}$  处负荷变化情况下直流母线电压  $V_c$  在 PBC 和 FT-PBC 两种控制下的对比波形图。

在图 5 中, 负荷端消耗功率增加, 直流母线电压  $V_c$  短暂下降, 但经过对比得出, PBC 控制下直流母线电压  $V_c$  收敛时间为  $0.08 \text{ s}$ , 而 FT-PBC 控制下直流母线电压  $V_c$  收敛时间为  $0.04 \text{ s}$ , 稳定速度快于 PBC 控制; 且电压波动范围也小于 PBC 控制。

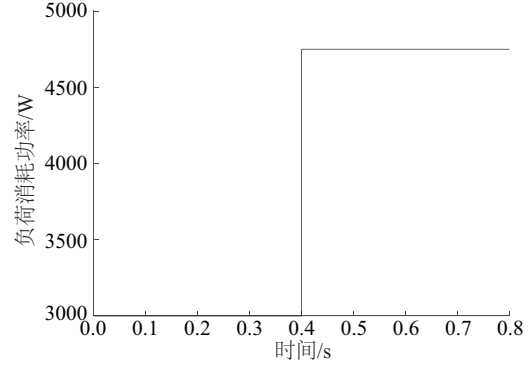


图3 负荷消耗功率  $P_{load}$  波形图

Fig. 3 Curve of  $P_{load}$

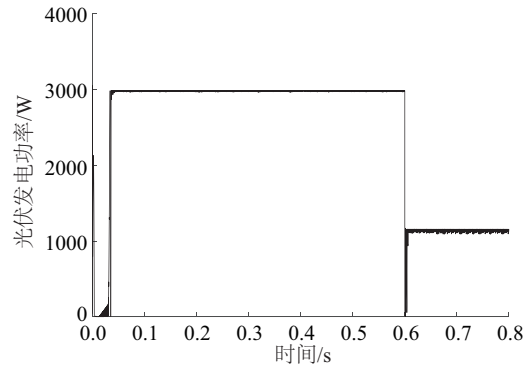


图4 光伏阵列输出功率  $P_{pv}$  波形图

Fig. 4 Curve of  $P_{pv}$

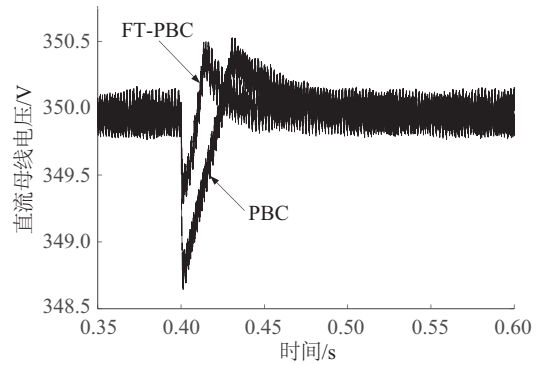


图5 在  $0.4 \text{ s}$  处的直流母线电压  $V_c$  对比波形图

Fig. 5 Comparison of responses of  $V_c$  at  $0.4 \text{ s}$

图 6 为 PBC 和 FT-PBC 控制下光伏阵列输出功率变化情况下的直流母线电压对比波形图。在

图 6 中, 0.6 s 处光伏阵列输出功率下降, 直流母线电压  $V_c$  短暂下降, 但 FT-PBC 控制下直流母线电压  $V_c$  收敛时间为 0.025 s, 明显快于 PBC 控制下的 0.1 s。

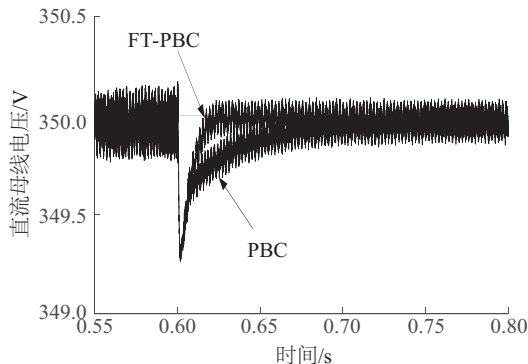


图 6 在 0.6 s 处的直流母线电压  $V_c$  对比波形图

Fig. 6 Comparison of responses of  $V_c$  at 0.6 s

经过仿真对比得出, 光照强度、负荷发生变化的情况下,  $V_c$  出现波动。但 FT-PBC 控制下,  $V_c$  收敛速度快于 PBC 控制, 且波动范围更小, 验证了控制策略的有效性。

## 5 结 论

为了提高直流微网中母线电压的稳定性能, 结合无源控制理论和有限时间控制方法, 提出一种基于混合储能的直流母线电压有限时间无源控制方法。通过理论分析与仿真验证, 所提出的方法具有以下优点: 1) 通过有限时间控制理论改进无源控制中的渐近收敛为有限时间收敛, 使混合储能系统能够在有限时间内稳定直流母线电压, 加快其稳定速度; 2) 可再生能源输出功率、负荷消耗功率变化情况下, 混合储能系统在有限时间无源控制下能够有效抑制直流母线电压波动, 降低了直流母线电压的波动范围。

### [参考文献]

- [1] 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.
- [1] Zhang Guoju, Tang Xisheng, Qi Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and battery in a micro-grid[J]. Automatic of Electric Power System, 2010, 34(12): 85—89.
- [2] Etxeberria A, Vechiu I, Cambilong H, et al.

- Comparison of sliding mode and PI control of a hybrid energy storage system in a microgrid application[J]. Energy Procedia, 2011, 12: 966—974.
- [3] Kraa O, Ghodbane H, Saadi R, et al. Energy management of fuel cell/supercapacitor hybrid source based on linear and sliding mode control[J]. Energy Procedia, 2015, 74: 1258—1264.
- [4] Hilaiet M, Ghanes M, Béthoux O, et al. A passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(8): 1097—1109.
- [5] 李 斌, 宝海龙, 郭 立. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8—15.
- [5] Li Bin, Bao Hailong, Guo Li. Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 8—15.
- [6] Bhat S P, Bernstein D S. Continuous finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 43(5): 678—682.
- [7] 李世华, 丁世宏, 都海波, 等. 非光滑控制理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [7] Li Shihua, Ding Shihong, Dou Haibo, et al. Non-smooth control theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [8] Komurcugil H. Adaptive terminal sliding-mode control strategy for DC-DC buck converters[J]. ISA Transactions, 2012, 51(6): 673—681.
- [9] 张小华, 刘慧贤, 丁世宏, 等. 基于扰动观测器和有限时间控制的永磁同步电机调速系统[J]. 控制与决策, 2009, 24(7): 1028—1032.
- [9] Zhang Xiaohua, Liu Huixian, Ding Shihong, et al. PMSM speed-adjusting system based on disturbance observer and finite-time control[J]. Control and Decision, 2009, 24(7): 1028—1032.
- [10] 王久和. 无源控制理论及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [10] Wang Jiuhé. Passivity-based control theory and its application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [11] Lin Chuan-Kai, Wang Sheng-De. Fuzzy system identification using an adaptive learning rule with terminal attractors[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 101(3): 343—352.

- [12] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751—766.
- [13] Bhat S P, Bernstein D S. Continuous finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 43(5): 678—682.
- [14] Hong Yiguang, Jiang Zhong-Ping. Finite-Time stabilization of nonlinear systems with parametric and dynamic uncertainties[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(12): 1950—1952.
- [15] Song Ting-Ting, Chung Shu-hung. Boundary control of boost converters using state-energy plane[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2): 551—563.
- [16] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
- [16] Gao Weibing. Theoretical basis of variable structure control[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990.
- [17] 符江升. 基于超级电容储能的光伏发电系统技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [17] Fu Jiangsheng. Research of photovoltaic power generation system based on the super-capacitor energy storage[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.

## FINITE-TIME PASSIVITY-BASED CONTROL METHOD FOR DC-BUS VOLTAGE BASED ON HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM

Yang Fan<sup>1</sup>, Tian Lei<sup>1</sup>, Li Hao<sup>2</sup>, Li Dongdong<sup>1</sup>, Lin Shunfu<sup>1</sup>

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. China Ship Scientific Research Center, China Shipbuilding Industry Corporation No. 704 Research Institute, Shanghai 200031, China)

**Abstract:** For increasing the DC bus voltage convergence performance and enhancing its anti-interference, a new finite-time passivity-based control (FT-PBC) method for DC bus voltage based on hybrid energy storage system (HESS) is proposed. For the problem of asymptotic convergence in passivity-based control (PBC), the performance of asymptotic convergence was transformed into finite-time convergence by using the theory of finite-time control and introducing terminal attractors; The FT-PBC controller of HESS is designed based on the mathematical model of HESS; The simulation of stand-alone photovoltaic (PV) system are accomplished and the PBC controller of HESS is designed for comparing and evaluating the proposed method. The results demonstrate that the DC bus voltage with FT-PBC controller has the faster and stronger performance in convergence and anti-interference for load resistance and solar irradiance changes.

**Keywords:** finite-time passivity-based control(FT-PBC); passivity-based control(PBC); hybrid energy storage system (HESS); convergence; anti-interference