

独立直流微电网中燃料电池与超级电容的功率协调控制

杨帆, 盛波, 符杨

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对独立直流微电网的功率协调控制问题, 提出了一种无源控制 PBC (Passivity-Based Control) 与 PI 控制级联的 PBC-PI 控制策略。建立了系统的端口受控哈密顿 PCH (Port-Controlled Hamiltonian) 模型, 设计了系统的 PBC 控制器。考虑到系统参数扰动等原因, PBC 控制器会在直流母线电压上产生稳态误差, 为了消除这一稳态误差, 改善闭环系统对于参数扰动的鲁棒性, 设计了外环 PI 控制器调节直流母线电压。仿真结果表明, PBC-PI 控制策略可合理调节微电网的功率平衡, 稳定直流母线电压; 并改善闭环系统对于参数扰动的鲁棒性。

关键词: 独立直流微电网; 燃料电池; 超级电容; 无源控制; PI 控制; 端口受控哈密顿; 鲁棒性

中图分类号: TM 91

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.017

0 引言

在能源危机和环境保护的双重压力下, 微电网技术受到了世界各国的广泛关注与应用。微电网是指将分布式电源、储能装置、负载以及控制装置等结合在一起的独立供电系统, 既可并网运行, 也可离网运行^[1-3]。目前, 微电网的结构主要包括交流微电网和直流微电网。与交流微电网相比, 直流微电网具有其独特的优势^[4-6]: 直流微电网不需要对电压的相位和频率进行跟踪, 可靠性和可控性都大幅提高, 更适合分布式电源、储能装置及负载的接入; 直流微电网仅需考虑网内有功功率的平衡, 无需考虑无功功率的流动; 直流微电网的能量转换次数少、效率高、成本低。

针对独立直流微电网中分布式电源与储能装置之间的功率协调控制问题, 国内外研究人员进行了大量的研究。文献[7-8]基于传统的 PI 方法设计了独立直流发电系统的功率控制策略。然而, 直流微电网系统是一种具有多变换器结构的强非线性系统, PI 控制以系统的线性化模型为基础, 未考虑系统中电力电子变换器的非线性特性, 使得闭环系统只能在一定的范围内稳定^[9]。因此, 针对这一强非线性系统, 利用非线性控制方法设计系统的功率分配策略是十分必要的。文献[10]基于滑模控制实现了超级电容 SC (SuperCapacitor) 的快速充放电, 稳定了直流母线电压。文献[11]利用小波变换技术将负载需求功率分为高频和低频部分, 分别由超级电容和

燃料电池提供。文献[12]基于微分平滑理论设计了含燃料电池发电系统的功率控制策略。上述非线性控制策略虽能够合理调节微电网的功率平衡, 维持母线电压稳定, 但忽略了系统的能量特性及物理结构特性。

无源控制 PBC (Passivity-Based Control) 方法作为一种非线性控制方法, 从系统的能量角度出发, 可实现闭环系统的渐近稳定^[13]。目前, PBC 方法已被广泛应用于电力系统、电力电子及电机控制等领域^[14-17]。因此采用 PBC 方法从能量的角度设计稳定的系统功率控制器具有一定的实际意义。

本文针对含有燃料电池和超级电容的独立直流微电网功率协调控制问题, 提出了一种 PBC-PI 级联控制策略。其中, PBC 用于调节微电网的有功功率平衡, 稳定直流母线的电压; PI 控制用于改善闭环系统对于参数扰动的鲁棒性。最后, 通过仿真实验对 PBC-PI 控制策略进行了验证。

1 独立直流微电网结构

图 1 是独立直流微电网系统的拓扑结构图。其中, 光伏阵列和燃料电池通过单向 DC/DC 变换器与直流母线连接, 风电通过 AC/DC 逆变器与直流母线连接, 超级电容储能装置通过双向 DC/DC 变换器与直流母线连接。

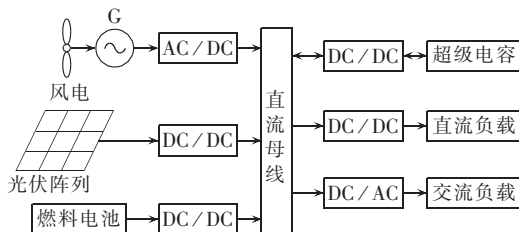


图 1 独立直流微电网拓扑结构图

Fig.1 Topology of isolated DC microgrid

收稿日期: 2015-10-21; 修回日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51407114); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目 (13DZ2251900)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51407114) and the Project of Shanghai Green Energy Grid Connected Technology Engineering Research Center (13DZ2251900)

在微电网的控制方面,风电和光伏阵列的输出功率受天气等自然条件的影响较大,发电具有明显的波动性和间歇性,可采用最大功率点跟踪(MPPT)控制,不参与微电网的有功功率调节;燃料电池的输出功率受天气等自然条件的影响较小,且具有连续的供电能力,因此可结合燃料电池调节网内有功功率的平衡。然而,燃料电池的燃料供应系统中包含一系列的泵、管道、阀门等机械元件,受这些装置反应速度的限制,燃料电池的动态特性较慢,快速变化的负载用电需求会导致“燃料饥饿”现象,影响燃料电池的使用寿命。因此,为了保护燃料电池,需将燃料电池与具有快速充放电能力的超级电容配合使用。当风电和光伏阵列的输出或者负载的用电需求发生变化时,超级电容可以快速补偿微电网内的暂态能量不平衡,起到保护燃料电池、稳定直流母线电压的作用。

2 独立直流微电网建模

图 2 所示为本文研究的独立直流微电网系统的等效模型。在该等效模型中,风电和光伏阵列采用最大功率点跟踪控制,不参与微电网的有功功率调节;为了简化分析,将风电和光伏阵列与负载一起等效为一个电流源。功率协调控制的对象为燃料电池和超级电容,其中燃料电池通过 Boost 变换器与直流母线连接;超级电容通过双向 DC/DC 变换器与直流母线连接^[18]。

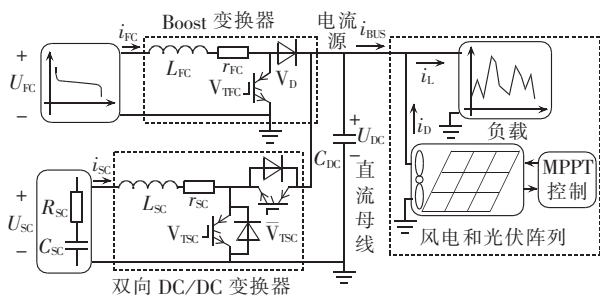


图 2 独立直流微电网等效模型

Fig.2 Equivalent model of isolated DC microgrid

2.1 燃料电池模型

根据电解质的不同,燃料电池主要分为质子交换膜燃料电池 PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)、熔融碳酸盐燃料电池 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell)和固体氧化物燃料电池 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell)。相比于其他燃料电池,PEMFC 因具有能量密度高、工作温度低、启动速度快以及使用寿命长等显著优点受到了研究人员的广泛关注。PEMFC 的静态模型为^[19]:

$$U_{FC} = E_0 - A \ln \left(\frac{i_{FC} + i_n}{i_e} \right) - R_m (i_{FC} + i_n) + B \ln \left(1 - \frac{i_{FC} + i_n}{i_{lim}} \right) \quad (1)$$

其中, U_{FC} 为 PEMFC 的输出电压; E_0 为 PEMFC 的开路电压; i_{FC} 为 PEMFC 的电流; i_n 为内部电流; i_e 为交换电流; i_{lim} 为限制电流; R_m 为膜电阻; A 为塔菲尔斜率; B 为质量转移常数。

2.2 超级电容模型

超级电容模型采用由理想电容 C_{SC} 和等效电阻 R_{SC} 串联组成的一阶 RC 模型,如图 2 所示。此模型忽略了高频段电感及长时间工作时漏电流对超级电容性能的影响,能够正确反映超级电容在充放电过程中的外在电气特性^[20]。

2.3 独立直流微电网端口受控哈密顿模型

假定 Boost 变换器和双向 DC/DC 变换器都处于连续工作模式,选取电感 L_{FC} 的电流 i_{FC} 、电感 L_{SC} 的电流 i_{SC} 以及电容 C_{DC} 的电压 U_{DC} 作为系统的状态变量,即:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [i_{FC} \ i_{SC} \ U_{DC}]^T \quad (2)$$

基于回路电压 KVL 和节点电流 KCL,经计算可得微电网的状态空间模型为:

$$\begin{cases} L_{FC} \dot{x}_1 = U_{FC} - u_1 x_3 - r_{FC} x_1 \\ L_{SC} \dot{x}_2 = U_{SC} - u_2 x_3 - r_{SC} x_2 \\ C_{DC} \dot{x}_3 = u_1 x_1 + u_2 x_2 - i_{BUS} \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_{SC} 为超级电容的输出电压; r_{FC} 和 r_{SC} 分别为电感 L_{FC} 和 L_{SC} 的寄生电阻; α_1 和 α_2 分别为功率开关管 V_{TFC} 和 V_{TSC} 的占空比信号; u_1 、 u_2 为控制律, $u_1 = 1 - \alpha_1$, $u_2 = 1 - \alpha_2$ 。

定义储存在电感 L_{FC} 、 L_{SC} 以及电容 C_{DC} 中的能量总和为系统的能量函数 $H(\mathbf{x})$,即:

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} L_{FC} x_1^2 + \frac{1}{2} L_{SC} x_2^2 + \frac{1}{2} C_{DC} x_3^2 \quad (4)$$

根据无源性理论的相关知识^[11],结合式(2)~(4),经计算可得微电网的端口受控哈密顿 PCH(Port-Controlled Hamiltonian)模型为:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{-r_{FC}}{L_{FC}^2} & 0 & \frac{-u_1}{L_{FC} C_{DC}} \\ 0 & \frac{-r_{SC}}{L_{SC}^2} & \frac{-u_2}{L_{SC} C_{DC}} \\ \frac{u_1}{L_{FC} C_{DC}} & \frac{u_2}{L_{SC} C_{DC}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{FC} x_1 \\ L_{SC} x_2 \\ C_{DC} x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{FC}/L_{FC} \\ U_{SC}/L_{SC} \\ -i_{BUS}/C_{DC} \end{bmatrix} \quad (5)$$

表征系统各个状态变量之间的互联特性的矩阵 $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 为:

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-u_1}{L_{FC}C_{DC}} \\ 0 & 0 & \frac{-u_2}{L_{SC}C_{DC}} \\ \frac{u_1}{L_{FC}C_{DC}} & \frac{u_2}{L_{SC}C_{DC}} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

表征系统自然阻尼特性的矩阵 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 为:

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \text{diag}\left(\frac{r_{FC}}{L_{FC}^2}, \frac{r_{SC}}{L_{SC}^2}, 0\right) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 中的元素都不小于 0。

输入矩阵 $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 为:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [U_{FC}/L_{FC} \quad U_{SC}/L_{SC} \quad -i_{BUS}/C_{DC}]^T \quad (8)$$

3 PBC-PI 控制策略设计

3.1 PBC 控制器设计

定义 $x_i^* (i=1, 2, 3)$ 为状态变量 x_i 的期望平衡点。为了使直流微电网在稳态时能够收敛到期望的平衡点, 定义闭环系统的能量函数 $H_d(\mathbf{x})$ 为:

$$H_d(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}L_{FC}(x_1 - x_1^*)^2 + \frac{1}{2}L_{SC}(x_2 - x_2^*)^2 + \frac{1}{2}C_{DC}(x_3 - x_3^*)^2 \quad (9)$$

采用自然互联与注入阻尼的方式设计微电网的 PBC 控制器, 即令注入微电网中的互联矩阵 $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ 和阻尼矩阵 $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ 为:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_a(\mathbf{x}) = 0 \\ \mathbf{R}_a(\mathbf{x}) = \text{diag}(r_1/L_{FC}^2, r_2/L_{SC}^2, r_3/C_{DC}^2) \end{cases} \quad (10)$$

其中, $r_i (i=1, 2, 3)$ 为注入的阻尼系数; 矩阵 $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ 中的元素都不小于 0。

根据 PBC 方法的设计步骤^[19], 将 $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 、 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{J}_a(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ 以及 $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 代入含有控制律 $\mathbf{u}$ 的如下矩阵方程:

$$[\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{J}_a(\mathbf{x}) - (\mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_a(\mathbf{x}))] \frac{\partial(\mathbf{H}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{H}(\mathbf{x}))}{\partial \mathbf{x}} = -(\mathbf{J}_a(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_a(\mathbf{x})) \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (11)$$

经计算, 式(11)的矩阵方程可化简为以下代数方程组:

$$\begin{cases} (r_1 + r_{FC})x_1^* + u_1x_3^* = r_1x_1 + U_{FC} \\ u_2x_3^* + (r_2 + r_{SC})x_2^* = r_2x_2 + U_{SC} \\ -u_1x_1^* - u_2x_2^* + r_3x_3^* + i_{BUS} = r_3x_3 \end{cases} \quad (12)$$

所设计的 PBC 控制器通过控制 PEMFC 的电流 x_1 使其趋向于期望平衡点 x_1^* , 控制超级电容的电流 x_2 使其趋向于期望平衡点 x_2^* , 间接控制直流母线的电压 x_3 使其趋向于期望平衡点 x_3^* , 最终实现状态变量 x_i 趋向于期望平衡点 x_i^* 。因此, 式(12)的一个简单解为 $r_3=0$, 此时经计算可得控制律 $\mathbf{u}$ 为:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{x_3^*} [U_{FC} + r_1(x_1 - x_1^*) - r_{FC}x_1^*] \\ u_2 = \frac{1}{x_3^*} [U_{SC} + r_2(x_2 - x_2^*) - r_{SC}x_2^*] \end{cases} \quad (13)$$

若适当地选择注入的阻尼系数 r_1 和 r_2 , 则微电网将能够快速地收敛到期望的平衡点。

3.2 平衡点分析

由式(13)可知, 为了得到 PBC 控制器的控制律 $\mathbf{u}$, 必须提前计算出状态变量 x_i 的期望平衡点 x_i^* 。

在直流微电网中, 超级电容的作用是提供或吸收暂态能量, 所以稳态时超级电容中无能量交换, 其电流 x_2 为 0, 即 $x_2^*=0$ 。同时, 设定直流母线电压 x_3 的参考值为 U_d , 即 $x_3^*=U_d$ 。

当直流微电网达到稳态时, 将 $x_2^*=0$ 及 $x_3^*=U_d$ 代入微电网的状态空间模型式(3), 经计算可得:

$$\begin{cases} 0 = U_{FC} - U_1U_d - r_{FC}x_1^* \\ 0 = U_{SC} - U_2U_d \\ 0 = U_1x_1^* - i_{BUS} \end{cases} \quad (14)$$

其中, U_1 和 U_2 分别为控制率 u_1 和 u_2 的稳态值。

求解式(14)可得 PEMFC 电流 x_1 的期望平衡点 x_1^* 为:

$$x_1^* = \frac{1}{2} \left[\frac{U_{FC}}{r_{FC}} - \sqrt{\left(\frac{U_{FC}}{r_{FC}}\right)^2 - \frac{4U_d i_{BUS}}{r_{FC}}} \right] \quad (15)$$

综上所述, 直流微电网系统的状态变量的期望平衡点为:

$$\mathbf{x}^* = \left[\frac{1}{2} \left[\frac{U_{FC}}{r_{FC}} - \sqrt{\left(\frac{U_{FC}}{r_{FC}}\right)^2 - \frac{4U_d i_{BUS}}{r_{FC}}} \right], 0, U_d \right]^T \quad (16)$$

3.3 稳定性证明

根据式(5)、式(9)和式(13), 经计算可得直流微电网闭环系统的 PCH 模型为:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \frac{\partial \mathbf{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{FC}+r_1}{L_{FC}^2} & 0 & \frac{-u_1}{L_{FC}C_{DC}} \\ 0 & -\frac{r_{SC}+r_2}{L_{SC}^2} & \frac{-u_2}{L_{SC}C_{DC}} \\ \frac{u_1}{L_{FC}C_{DC}} & \frac{u_2}{L_{SC}C_{DC}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{FC}(x_1 - x_1^*) \\ L_{SC}(x_2 - x_2^*) \\ C_{DC}(x_3 - x_3^*) \end{bmatrix} \quad (17)$$

期望互联矩阵 $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$ 为:

$$\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-u_1}{L_{FC}C_{DC}} \\ 0 & 0 & \frac{-u_2}{L_{SC}C_{DC}} \\ \frac{u_1}{L_{FC}C_{DC}} & \frac{u_2}{L_{SC}C_{DC}} & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

期望阻尼矩阵 $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$ 为:

$$\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \text{diag}\left(\frac{r_{FC}+r_1}{L_{FC}^2}, \frac{r_{SC}+r_2}{L_{SC}^2}, 0\right) \quad (19)$$

对闭环系统的能量函数 $\mathbf{H}_d(\mathbf{x})$ 沿式(17)的轨迹求导可得:

$$\dot{\mathbf{H}}_d = -\frac{\partial \mathbf{H}_d^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{R}_d(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathbf{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -[(r_{FC}+r_1)(x_1 - x_1^*)^2 + (r_{SC}+r_2)(x_2 - x_2^*)^2] \quad (20)$$

由于阻尼系数 $r_1 \geq 0$ 、 $r_2 \geq 0$, 电阻 $r_{FC} > 0$ 、 $r_{SC} > 0$, 故式(20)满足:

$$\dot{H}_d = -\frac{\partial H_d^T(x)}{\partial x} R_d(x) \frac{\partial H_d(x)}{\partial x} \leq 0 \quad (21)$$

因此,根据 La Salle's 不变集定理^[21]可知独立直流微电网的闭环系统是渐近稳定的。

3.4 PI 控制器设计

理论上,如果直流微电网中不存在参数扰动,则所设计的 PBC 控制器能够控制 PEMFC 的电流 x_1 使其趋向于 x_1^* 及超级电容的电流 x_2 使其趋向于 x_2^* ,间接控制直流母线的电压 x_3 使其趋向于 x_3^* 。但在实际运行中,由于参数扰动(如 L_{FC} 、 L_{SC} 、 r_{FC} 和 r_{SC})的原因导致由式(16)计算出的期望平衡点不精确,因而,仅使用 PBC 控制器将会在直流母线电压上产生稳态误差 $\eta(\eta=x_3^*-x_3)$ 。为了消除这一稳态误差、改善闭环系统对于参数扰动的鲁棒性,在 PBC 控制器的基础上设计了以下具有抗积分饱和作用的 PI 控制器。

$$\begin{cases} \eta = x_3^* - x_3 \\ x_1^* = K_p \eta + K_i \int \eta dt \end{cases} \quad (22)$$

其中, K_p 和 K_i 分别为比例系数和积分系数。

图 3 是 PBC-PI 控制策略的结构图。从图中可以看出,PI 控制器作为外环电压控制器,控制直流母线的电压;PBC 控制器作为内环电流控制器,控制 PEMFC 和超级电容的电流。

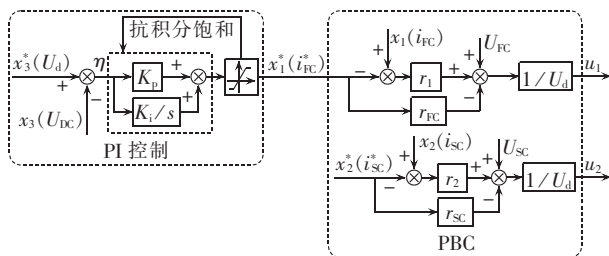


图 3 PBC-PI 控制策略

Fig.3 Schematic diagram of PBC-PI control strategy

4 仿真与分析

为了验证本文所提 PBC-PI 控制策略的有效性及其适用性,在 MATLAB/Simulink 软件中搭建了直流微电网闭环系统的仿真模型,并分别对“微电网无参数扰动”和“微电网有参数扰动”2 种情况进行了仿真测试。在仿真实验中,PEMFC 模型由 46 个 PEMFC 单体串联组成,额定工作点为 46 A/1200 W;超级电容模型由 2 个超级电容模块串联组成,每个超级电容模块由 6 个 2.7 V/1500 F 的超级电容单体串联组成。PEMFC 单体仿真参数如下:开路电压 $E_0=0.98$ V,交换电流 $i_e=0.36$ A,内部电流 $i_n=0.5$ A,限制电流 $i_{lim}=100$ A,膜电阻 $R_m=1.4$ mΩ,塔菲尔斜率 $A=0.05$,质量转移常数 $B=0.205$ 。直流微电网仿真参数如下:等效电容 $C_{SC}=125$ F,等效电阻 $R_{SC}=10$ mΩ,直流母线电容 $C_{DC}=10$ mF,电感 $L_{FC}=300$ μH,电感

$L_{SC}=200$ μH,电阻 $r_{FC}=20$ mΩ,电阻 $r_{SC}=10$ mΩ,阻尼系数 $r_1=5$,阻尼系数 $r_2=0.05$,比例系数 $K_p=1.26$,积分系数 $K_i=7.9$,直流母线电压参考值 $U_d=100$ V。

4.1 无参数扰动的仿真分析

此仿真实验是在微电网系统无参数扰动的情况下验证 PBC 策略的正确性及有效性,并与传统的双环 PI 控制策略进行了比较。

图 4 为设定的 i_{BUS} 变化曲线。图 5 为在 PBC 下的系统响应曲线。其中,图 5(a)为直流母线电压的响应曲线;图 5(b)为 PEMFC 电压和电流的响应曲线;图 5(c)为超级电容电压和电流的响应曲线;图 5(d)

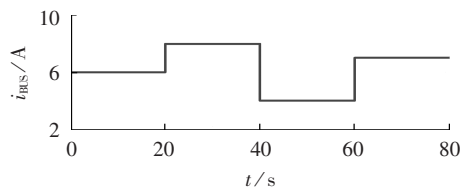
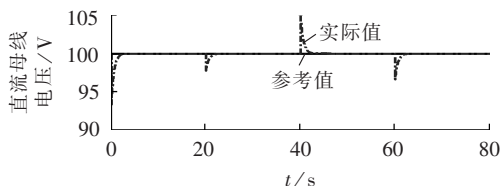
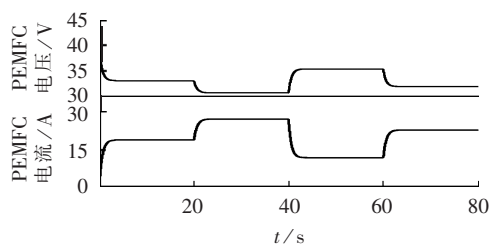


图 4 i_{BUS} 变化曲线

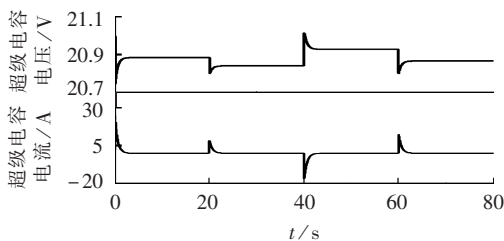
Fig.4 Curve of i_{BUS}



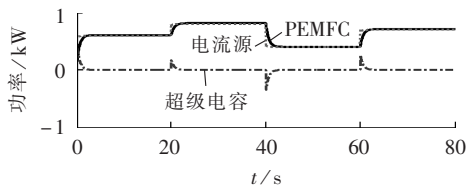
(a) 直流母线电压



(b) PEMFC 电压和电流



(c) 超级电容电压和电流



(d) 功率流动

图 5 无参数扰动时 PBC 下的系统响应曲线
Fig.5 Response curves of system with PBC, without parameter disturbance

为 PEMFC、超级电容和电流源之间的功率流动曲线。

结合图 4 和图 5(a)可以看出,当 i_{BUS} 发生变化时,直流母线电压 U_{DC} 存在短时脉动,且能够快速恢复到参考值 100 V;当 $t=20$ s 时, i_{BUS} 从 6 A 增加为 8 A, U_{DC} 的脉动幅度约为 2%;当 $t=40$ s 时, i_{BUS} 从 8 A 减少为 4 A, U_{DC} 的脉动幅度约为 5%;当 $t=60$ s 时, i_{BUS} 从 4 A 增加为 7 A, U_{DC} 的脉动幅度约为 4%。从图 5(b)中可以看出,当 t 为 20 s、40 s 和 60 s 时, PEMFC 的电压 U_{FC} 和电流 i_{FC} 变化缓慢, PEMFC 向电流源提供稳态能量。从图 5(c)中可以看出,当 $t=20$ s 和 60 s 时,超级电容的电流大于 0 A,超级电容放电,并向电流源提供暂态能量;当 $t=40$ s 时,超级电容的电流小于 0 A,超级电容充电,并吸收电流源反馈的暂态能量;当系统达到稳态时,超级电容的电流等于 0 A,超级电容不提供能量。

图 6 为双环 PI 控制下的系统响应曲线。双环 PI 控制的参数 (K_p, K_i) 分别为:直流母线电压外环

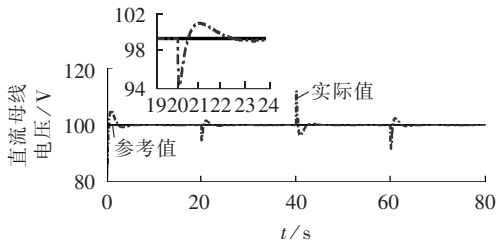
的参数 (K_p, K_i) 为 (12.6, 39.5); PEMFC 电流内环的参数 (K_p, K_i) 为 (0.0126, 39.5); 超级电容电压外环的参数 (K_p, K_i) 为 (1600, 5000); 超级电容电流内环的参数 (K_p, K_i) 为 (0.0126, 39.5)。图 6(a) 为直流母线电压的响应曲线,从图中可以看出,当 $t=20$ s 时, U_{DC} 的脉动幅度约为 6%;当 $t=40$ s 时, U_{DC} 的脉动幅度约为 12%;当 $t=60$ s 时, U_{DC} 的脉动幅度约为 10%。

比较图 5 和图 6 可以发现, PBC 策略和双环 PI 控制策略都能够稳定直流母线电压,合理分配 PEMFC 和超级电容的出力,使 PEMFC 提供稳态能量,使超级电容提供或吸收暂态能量;但当 i_{BUS} 发生变化时,双环 PI 控制策略下的直流母线电压脉动幅度较大,而 PBC 策略下的直流母线电压脉动幅度较小。此外,与双环 PI 控制相比, PBC 无需对微电网系统进行线性化建模,简化了功率控制器的设计过程,提高了功率控制器的精度;此外, PBC 充分利用了微电网的物理结构特性和能量特性,并能够从理论上保证闭环系统渐近稳定。

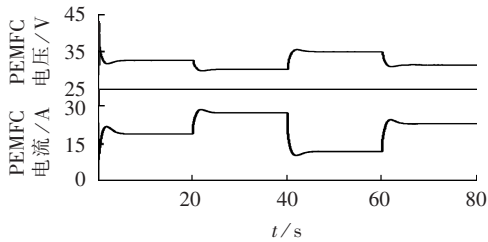
4.2 有参数扰动的仿真分析

此仿真实验是在微电网系统有参数扰动的情况下验证 PBC-PI 控制策略的正确性及有效性,并与 PBC 策略进行比较。

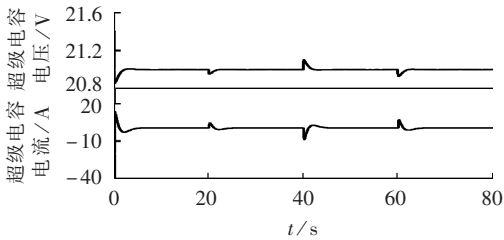
设定 Boost 变换器和双向 DC/DC 变换器中的 L_{FC} 、 L_{SC} 、 r_{FC} 和 r_{SC} 的值同时增大 3 倍作为系统的参数扰动;同时,设定 i_{BUS} 变化曲线如图 4 所示。图 7 为在 PBC 下的系统响应曲线,图 8 为在 PBC-PI 控制下的系统响应曲线。



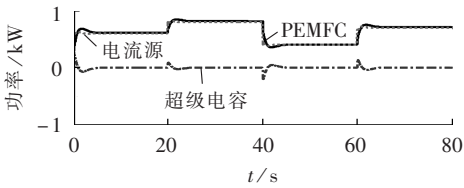
(a) 直流母线电压



(b) PEMFC 电压和电流

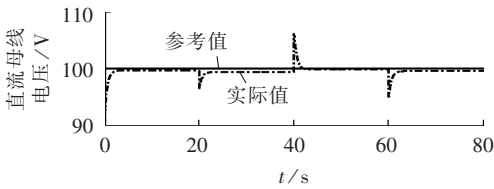


(c) 超级电容电压和电流

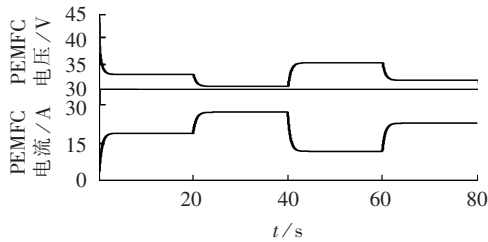


(d) 功率流动

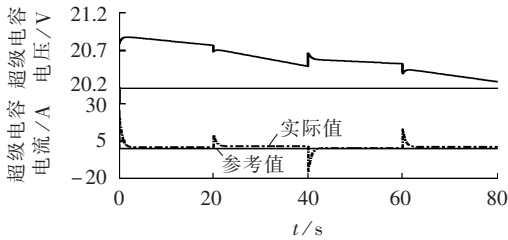
图 6 无参数扰动时双环 PI 控制下的系统响应曲线
Fig.6 Response curves of system with dual-loop PI control, without parameter disturbance



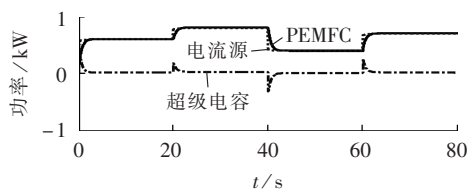
(a) 直流母线电压



(b) PEMFC 电压和电流



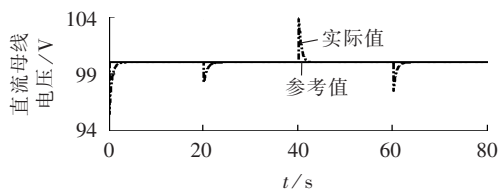
(c) 超级电容电压和电流



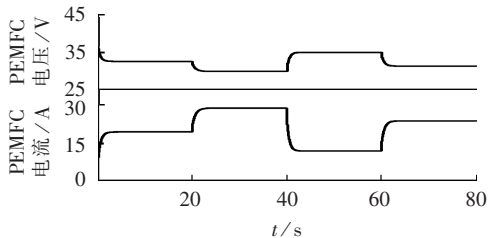
(d) 功率流动

图 7 有参数扰动时 PBC 下的系统响应曲线

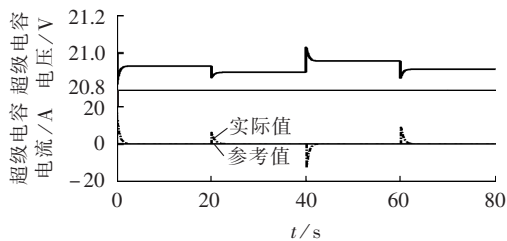
Fig.7 Response curves of system with PBC, with parameter disturbance



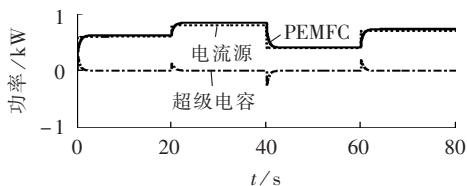
(a) 直流母线电压



(b) PEMFC 电压和电流



(c) 超级电容电压和电流



(d) 功率流动

图 8 有参数扰动时 PBC-PI 控制下的系统响应曲线

Fig.8 Response curves of system with PBC-PI control, with parameter disturbance

从图 7 可以看出,当系统存在参数扰动时,PBC 下的直流母线电压 U_{DC} 和超级电容电流 i_{SC} 都存在明显的稳态误差;这是由于参数扰动导致式(16)计算出的期望平衡点不精确,使得基于系统模型的 PBC 策略无法达到理想的控制效果。

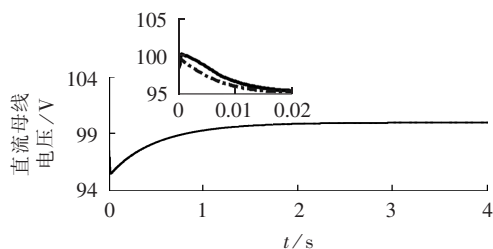
从图 8 中可以看出,PBC-PI 控制策略不仅能够稳定直流母线电压,合理分配 PEMFC 和超级电容的输出,使 PEMFC 提供稳态能量,使超级电容提供或吸收暂态能量;而且当系统存在参数扰动时,可以消

除直流母线电压 U_{DC} 和超级电容电流 i_{SC} 的稳态误差,增强闭环系统对参数扰动的鲁棒性。

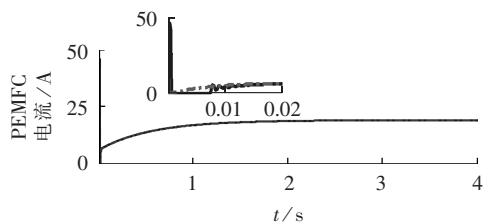
4.3 有系统延时的仿真分析

为了研究参数采样、传输与处理的延时对系统控制精度和稳定性的影响,设计了考虑延时环节的闭环系统仿真实验。其中,PBC-PI 反馈环节所需的 5 组电压电流信号均可由霍尔传感器检测,采样频率 f_s 为 20 kHz,采样周期 $T_s=0.05$ ms。模数转换采用 8 位 A/D 控制芯片 TLC549 实现,最大转换时间 $T_1=0.017$ ms。转换后的数据可利用 CAN 总线传输给 FPGA,设定 CAN 总线的传输速率为 500 kbit/s,则传输 40 bit 数据所需时间 $T_c=0.08$ ms。最后,PBC-PI 级联控制算法可由 Cyclone II 系列 FPGA 编程完成;考虑 FPGA 算法处理和产生数字式 PWM 信号的时间 $T_d=0.5T_s^{[22]}$ 。因此,在整个过程中总的控制延时时间 t_d 可表示为 $t_d=T_s+T_1+T_c+T_d=0.05$ ms + 0.017 ms + 0.08 ms + 0.05 ms = 0.197 ms。

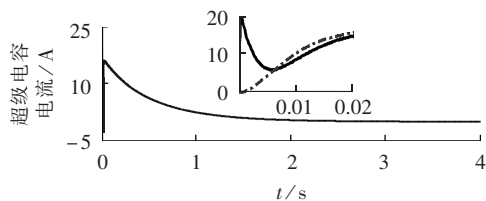
在 4.2 节仿真的基础上,搭建了含有延时环节的 PEMFC-超级电容混合系统闭环模型,并设置系统控制延时为 0.197 ms。图 9 比较了有延时影响和无延时影响 2 种条件下的混合系统响应曲线。从图中可以看出,在考虑延时影响的情况下,PBC-PI 控制器依



(a) 直流母线电压



(b) PEMFC 电流



(c) 超级电容电流

— 有延时, --- 无延时

图 9 考虑延时影响的 PBC-PI 控制系统响应曲线

Fig.9 Response curves of system with PBC-PI control, with delay effect

然能够控制直流母线电压 U_{DC} 、PEMFC 电流 i_{FC} 和超级电容电流 i_{SC} 在稳态时达到期望的平衡点。

5 结论

本文针对含有燃料电池和超级电容的独立直流微电网的功率协调控制问题,提出了一种 PBC-PI 级联控制策略。建立了微电网的 PCH 模型;从能量成型和阻尼注入的角度设计了微电网的 PBC 控制器;从理论上证明了闭环系统的渐近稳定性。在实际运行中,考虑到系统参数扰动等原因,PBC 控制器无法达到理想的控制效果。为了改善这一缺陷、增强闭环系统对于参数扰动的鲁棒性,在 PBC 控制器的基础上设计了外环 PI 控制器。仿真结果表明,PBC-PI 控制策略能够合理地调节微电网的功率平衡、稳定直流母线电压,改善闭环系统对参数扰动的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 郝雨辰,吴在军,窦晓波,等. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):27-35.
HAO Yuchen,WU Zaijun,DOU Xiaobo,et al. Application of multi-agent systems to the DC microgrid stability control [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):27-35.
- [2] 杨占刚,徐玉磊,王成山,等. 光储微电网运行特性及影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):15-20.
YANG Zhangang,XU Yulei,WANG Chengshan,et al. Operating characteristics and influencing factors of photovoltaic-storage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):15-20.
- [3] 吴雄,王秀丽,刘世民,等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):7-14.
WU Xiong,WANG Xiuli,LIU Shimin,et al. Summary of research on microgrid energy management system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):7-14.
- [4] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微电网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报,2012,27(1):98-106.
WU Weimin,HE Yuanbin,GENG Pan,et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):98-106.
- [5] 张学,裴玮,邓卫,等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5553-5562.
ZHANG Xue,PEI Wei,DENG Wei,et al. Energy management and coordinated control method for multi-source/multi-load DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(31):5553-5562.
- [6] 王毅,张丽荣,李和明,等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
WANG Yi,ZHANG Lirong,LI Heming,et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):16-24.
- [7] 唐西胜,齐智平. 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究[J]. 电工电能新技术,2006,25(3):37-41.
TANG Xisheng,QI Zhiping. Study on an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2006,25(3):37-41.
- [8] TOUFIK A,OLIVIER B,GHISLAIN R,et al. An innovative control strategy of a single converter for hybrid fuel cell/supercapacitor power source[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(12):4024-4031.
- [9] HASSAN E F,FOUAD G,JOSEP M G,et al. Modeling and nonlinear control of fuel cell/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2014,63(7):3011-3018.
- [10] 薛贵挺,张焰,祝达康. 孤立直流微电网运行控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):112-117.
XUE Guiting,ZHANG Yan,ZHU Dakang. Operational control strategy of stand-alone DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):112-117.
- [11] UZUNOGLU M,ALAM M S. Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a novel-wavelet-based load sharing algorithm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(1):263-272.
- [12] 郑文迪,蔡金铨. 燃料电池/超级电容器混合发电系统能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):28-32.
ZHENG Wendi,CAI Jinding. Energy management strategy for hybrid generation system with fuel cell and super-capacitor [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):28-32.
- [13] 王久和. 无源控制理论及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010:86-89.
- [14] 李敏,徐群. 基于 IDA-PBC 的 LCL 滤波并网逆变器控制[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(4):50-55.
LI Min,XU Qun. Control strategy based on IDA-PBC for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2014,26(4):50-55.
- [15] 李朝东,宋慧慧,曲延滨,等. 孤岛运行方式下微电网储能系统能量成型控制策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):48-55.
LI Chaodong,SONG Huihui,QU Yanbin,et al. Strategy of energy-shaping control for microgrid energy storage system in islanding operation mode[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):48-55.
- [16] TOFIGHI A,KALANTAR M. Applying passivity-based control for the DC/DC converter of PEM fuel cell[C]//Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference. Tehran,Iran:IEEE,2010:439-444.
- [17] KHANCHOU M,HILAIRET M,NORMAND-CYROT D. A passivity-based controller under low sampling for speed control of PMSM[J]. Control Engineering Practice,2014,26(1):20-27.
- [18] THOUNTHONG P,RAEL S. The benefits of hybridization[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine,2009,3(3):25-37.
- [19] SAADI A,BECHERIF M,ABOUBOU A,et al. Comparison of proton exchange membrane fuel cell static models[J]. Renewable Energy,2013,56(4):64-71.
- [20] 刘耀远,曾成碧,李庭敏,等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(13):77-82.

LIU Yaoyuan,ZENG Chengbi,LI Tingmin,et al. Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super-capacitor[J]. Power System Protection and Control,2014,42(13):77-82.

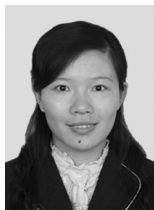
[21] ORTEGA R,SCHAFT A,MASCHKE B,et al. Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems[J]. Automatica,2002,38(4):585-596.

[22] 陈燕东. 微电网多逆变器控制关键技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

CHEN Yandong. Research on the key techniques of multi-

inverter control system in microgrid[D]. Changsha:Hunan University,2014.

作者简介:



杨帆(1981—),女,江苏连云港人,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电系统的设计与控制(E-mail:yangfan@shiep.edu.cn)。

Coordinated power control between fuel cell and supercapacitor for isolated DC microgrid

YANG Fan,SHENG Bo,FU Yang

(School of Electric Power Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China)

Abstract: A control strategy based on the cascaded PBC(Passivity-Based Control) and PI control is proposed for the coordinated power control of isolated DC microgrid. Its PCH(Port-Controlled Hamiltonian) model is established and its passivity-based controller is designed. An outer-loop PI controller is developed to eliminate the steady-state errors of DC bus voltage caused by the parameter disturbance for improving the robustness of closed-loop system. The simulative results show that,the PBC-PI control strategy could reasonably adjust the power balance of DC microgrid,stabilize the voltage of DC bus and improve the robustness of closed-loop system against parameter disturbance.

Key words: isolated DC microgrid; fuel cell; supercapacitor; passivity-based control; PI control; port-controlled Hamiltonian; robustness

(上接第 112 页 continued from page 112)

Transient stability emergency generator tripping control based on tie-line energy prediction

Part two:project case

ZHAO Jinqun¹,DENG Hui¹,XU Guanghu²,ZHANG Yong²,WU Xiaochen²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering,Ministry of Education,Hohai University,Nanjing 210098,China;2. China Southern Power Grid Co.,Ltd.,Guangzhou 510623,China)

Abstract: With the wide application of PMU/WAMS,the transient stability emergency control technology based on wide-area response has become possible. According to the emergency generator tripping control based on tie-line energy prediction and the transient instability detection based on voltage trajectory,a scheme of inter-area transient stability control is proposed for the interconnected systems,which adopts the master-slave control mode to carry out the inter-area transient instability detection and emergency generator tripping control. As a project,a detailed transient instability control scheme is established for the Guangdong-Guangxi section of China Southern Power Grid under a complex fault. The coordination between the proposed control method and the current safety & stability defence line is discussed. Simulative results show that,a rational and effective emergency generator tripping strategy is set by the proposed method to maintain the safe and stable operation of power grid.

Key words: inter-area transient stability; PMU/WAMS; emergency generator tripping control; China Southern Power Grid; power system defense line