

直流微电网自适应滑模控制策略

张 丹,王 杰,弥 潇

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要: 为提高微电网的稳定性,提出一种集自适应观测技术、滑模控制方法、定频 PWM 技术于一体的新型定频 PWM 自适应滑模控制策略,可在不需要增加额外传感器/硬件电路的情况下实现对状态变量的快速跟踪和调节,便于直流微电网内微电源和负荷的扩展与即插即用,且简化了滤波器的设计难度。同时,采用非线性复合控制方法在恒功率负载突变的情况下实现对母线电压和系统稳定控制的目标。初始状态的合理选择、变切换面的设计,使得状态变量全程处于滑动模态,并且抖振现象得以减轻。在包含光伏电源、燃料电池、蓄电池、双向 Buck/Boost 变换器、恒功率负载与阻性负载的直流微电网仿真环境中,验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 直流微电网; 定频 PWM 滑模控制; 自适应观测器; 恒功率负载; 双向 Buck/Boost 变换器

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.019

0 引言

微电网作为提高新能源吸纳能力的有效手段和大电网的有利补充,被广泛应用到海岛、偏远地区、工商、企业园区以及住宅和校园中。虽然交流微电网是目前应用比较广泛的微电网形式,但是直流微电网相比于交流微电网,成本低、效率高、易于控制,并且其无需考虑分布式电源(DG)之间的同步问题,负载不受电压变化、三相不平衡及谐波的影响,配电线路损耗低,所以其效率高于交流微电网^[1-2]。与交流微电网类似,直流微电网既可并网运行,也可离网运行,这对海岛、无电地区、船舰等供电系统尤为重要,因此研究孤岛型直流微电网的绿色、可靠供电具备重要的实际意义和应用价值。

直流微电网在离网运行时,母线电压的稳定成为评价其稳定运行与能量平衡状态的唯一标准。当孤岛直流微电网遭遇源、荷突变,或是需要为恒功率负载 CPLs(Constant Power Loads)供电时,母线电压的稳定就会遇到挑战^[3]。改进线性控制方法^[4-5]对变参数灵敏度的影响、系统的控制精度和鲁棒性是有限的。因此,非线性控制方法越来越多地被应用到微电网的研究中。文献[6-7]分别采用下垂方法与滑模控制 SMC(Sliding Mode Control)方法设计非线性控制器,但其均采用小信号建模方法,当运行点工作在远离线性化平衡点的区域时,小信号模型不能满足非线性系统全局稳定性的要求。文献[8]提出一种基于李雅普诺夫(Lyapunov)理论的反馈线性化方法,用以克服直流微电网中 CPLs 对全局稳定性的影响,但没有

考虑到实际系统中不确定量的影响。文献[9]提出一种应用于微电网的高阶 SMC 方法,该方法基于大信号建模理论,能够有效抑制变结构控制中存在的抖振问题,发挥 SMC 的优越性,但该方法不易获得不确定量的边界,对模型的依赖性强,因此限制了其在工程中的应用。为了发挥变结构控制对负载和电源波动的鲁棒性,文献[10-11]将 Washout 滤波器与滞环方法结合,提出抗扰性强的 SMC 器,但这种控制方法存在的明显缺陷是开关频率不固定,并且系统对噪声高度敏感。文献[12]提出自适应全局 SMC 方法以确保微电网的稳定性和动态性能,充分体现 SMC 对于参数不确定和外部扰动的鲁棒性。文献[13]将自适应非线性观测方法应用于功率因数校正型升压变换器中,能够在无负载信息的情况下,准确估计出负载值,该方法提供了一种可靠性强、成本且最小化使用传感器的途径。文献[14]将 PWM 方法应用于 SMC 中,从而得到一种定频 PWM-SMC 器,解决了滞环滑模控制 HB-SMC(Hysteresis Band-Sliding Mode Control)中的变频问题,使得无论占空比如何变化,开关频率都维持恒定。

虽然非线性方法比线性方法控制效果更优越,但单一的方法无法同时解决复合问题,如变换器的变结构特性、频率变化、参数摄动、CPLs 引起的扰动等。因此,研究非线性复合控制方法在孤岛直流微电网中的应用是很有必要的。为此,本文提出一种基于自适应观测器的全程 SMC 方法。该方法能够在外界扰动不确定的条件下,准确地估计负载和电池电压等参量,并且运用等效控制理论,通过控制起电压支撑作用的双向 Buck/Boost 变换器,在包含 CPLs 的直流微电网仿真环境中,达到在输入和参数摄动的情况下,保持直流母线电压和系统稳定的目的,从而验证所提方法的有效性。仿真结果表明,本文提出的定频

收稿日期:2016-09-21;修回日期:2017-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61374155);高校博士点基金资助项目(20130073110030)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61374155) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20130073110030)

PWM 自适应滑模控制(PWM-ASMC)方法,能够有效抑制 CPLs 波动对母线电压的冲击,确保供电系统的可靠性和稳定性。

1 系统描述

孤岛直流微电网结构如图 1 所示。图中 POL 变换器为负荷点变换器,通常将 POL 变换器与其所带负荷看作 CPLs,用 P_L 表示。将分布式电源(光伏电源、燃料电池等)和与之连接的 DC-DC 变换器看作恒功率电源 CPSs(Constant Power Sources) P_S ,集总功率 $P=P_L+P_S$ ^[15-16]。

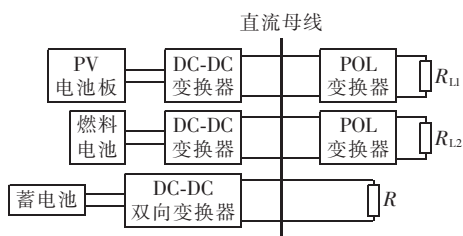


图 1 孤岛直流微电网结构图

Fig.1 Structure diagram of isolated DC microgrid

CPSs、CPLs 与阻性负载中功率流的方向是单方向的,如图 2 所示。CPS 功率流方向是由电源流向直流母线,CPLs 与阻性负载中功率流方向是由母线流向负载。而双向 Buck/Boost 变换器中功率流的方向是双向的,既可以由蓄电池到母线,此时电源提供的功率不足以满足负载需求,蓄电池处于放电状态 $P>0$;也可以由母线到蓄电池,此时电源输出的功率多于负载消耗的功率,蓄电池处于充电状态 $P\leq 0$,电源为整个微电网系统提供电能。

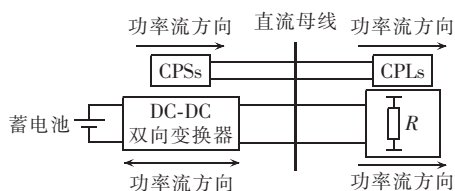


图 2 能量流图

Fig.2 Diagram of energy flow

为了便于分析,本文将微电网的拓扑结构简化为如图 3 所示的形式。母线电流表示如式(1)所示。

$$i_{bus} = i_R + i_P = \frac{u_{bus}}{R} + \frac{P}{u_{bus}} \quad (1)$$

其中, R 为阻性负载电阻; i_R 和 i_P 分别为流经 R 和 P

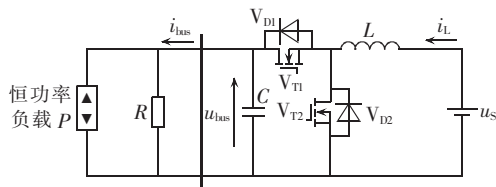


图 3 微电网等效拓扑图

Fig.3 Equivalent topology diagram of DC microgrid

的电流,且 R 和 P 是时变的^[17]。

本文只考虑电流连续导电模式(CCM)下的情况,CCM 下微电网系统非线性动态大信号模型如下:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = u_s - u u_{bus} \\ C \frac{du_{bus}}{dt} = u i_L - i_{bus} \end{cases} \quad (2)$$

其中, i_L 为电感电流; u_{bus} 为母线电压; u_s 为蓄电池电压; u 为系统的控制量^[18-19], V_{T1} 与 V_{T2} 互补导通,当 V_{T1} 导通时 $u=1$,当 V_{T2} 导通时 $u=0$ 。为简化分析,用 x_1 替换 i_L ,用 x_2 替换 u_{bus} ,则:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{Q}{L} - \frac{u x_2}{L} \\ \dot{x}_2 = \frac{u x_1}{C} - \frac{M x_2}{C} - \frac{N}{C x_2} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $M=1/R \in \mathbf{R}^+$, $N=P \in \mathbf{R}$, $Q=u_s \in \mathbf{R}^+$ 。

2 控制策略

2.1 自适应观测器

自适应观测器对数学模型要求较低,对参数变化及外部干扰均具备良好的鲁棒性,成为目前研究的热点。本文利用自适应观测器的上述优点,结合参数估计理论,设计自适应观测器如下。

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \frac{\hat{Q}}{L} - \frac{u \hat{x}_2}{L} + K_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \frac{u \hat{x}_1}{C} - \frac{\hat{M} x_2}{C} - \frac{\hat{N}}{C x_2} + K_2(x_2 - \hat{x}_2) \end{cases} \quad (4)$$

其中,观测器增益 $K_1>0, K_2>0$; $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{M}, \hat{N}, \hat{Q}$ 分别为 x_1, x_2, M, N, Q 的估计值; x_1 和 x_2 为可测量状态变量^[20-22]。令 $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1, \tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2, \tilde{M} = M - \hat{M}, \tilde{N} = N - \hat{N}, \tilde{Q} = Q - \hat{Q}$,则自适应观测器误差方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \frac{\tilde{Q}}{L} - \frac{u \tilde{x}_2}{L} - K_1 \tilde{x}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \frac{u \tilde{x}_1}{C} - \frac{\tilde{M} x_2}{C} - \frac{\tilde{N}}{C x_2} - K_2 \tilde{x}_2 \end{cases} \quad (5)$$

取正定的 Lyapunov 函数为如下形式:

$$V = \frac{1}{2} L \tilde{x}_1^2 + \frac{1}{2} C \tilde{x}_2^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{M}^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{N}^2 + \frac{1}{2\gamma_3} \tilde{Q}^2 \quad (6)$$

其中,自适应增益 $\gamma_1>0, \gamma_2>0, \gamma_3>0$ 。对 Lyapunov 函数求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & L \tilde{x}_1 \dot{\tilde{x}}_1 + C \tilde{x}_2 \dot{\tilde{x}}_2 + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{M} \dot{\tilde{M}} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{N} \dot{\tilde{N}} + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{Q} \dot{\tilde{Q}} = \\ & -K_1 L \tilde{x}_1^2 - K_2 C \tilde{x}_2^2 - \tilde{M} \left(x_2 \tilde{x}_2 + \frac{\dot{\tilde{M}}}{\gamma_1} \right) - \\ & \tilde{N} \left(\frac{\tilde{x}_2}{x_2} + \frac{\dot{\tilde{N}}}{\gamma_2} \right) + \tilde{Q} \left(\tilde{x}_1 - \frac{1}{\gamma_3} \dot{\tilde{Q}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

为消除 $\dot{V}$ 中符号不确定项对状态收敛的影响,

构造自适应律如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{M}} = -\gamma_1 \tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \\ \dot{\hat{N}} = -\gamma_2 \frac{\tilde{x}_2}{x_2} \\ \dot{\hat{Q}} = \gamma_3 \tilde{x}_1 \end{cases} \quad (8)$$

则 $\dot{V} = -K_1 L \tilde{x}_1^2 - K_2 C \tilde{x}_2^2 \leq 0$, $\dot{V}$ 为半负定。根据 Lasalle 不变定理, $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$ 渐进收敛于 0。

2.2 SMC 器

对于状态空间 $\mathbf{x} = [x_1, x_2] \in \mathbf{R}^2$, 可设计一个不连续的流形 $\Sigma: \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^2: S(\mathbf{x}) = 0\}$, 此流形通过式(9)所示的时变切换函数将状态空间分为两部分。

$$S(\mathbf{x}) = S = \hat{x}_1 - x_{1_ref} \quad (9)$$

其中, x_{1_ref} 为 i_L 的参考值。本文选取电流估计误差作为滑模切换函数, 不需要增加电压误差积分项, 这是因为母线电压稳态误差非常小。

当系统达到稳态时, 根据能量守恒定律, 可得:

$$I_{L_ref} = \frac{U_{bus_ref}^2 M + N}{Q} \quad (10)$$

其中, I_{L_ref} 为稳态电感电流参考值; U_{bus_ref} 为稳态母线电压的参考值。则 x_{1_ref} 可表示为如下形式:

$$x_{1_ref} = U_{bus_ref}^2 \frac{\hat{M}}{\hat{Q}} + \frac{\hat{N}}{\hat{Q}} \quad (11)$$

因此, $\dot{S}$ 可表示为:

$$\dot{S} = \frac{\hat{Q}}{L} - \frac{u \hat{x}_2}{L} + K_1 \tilde{x}_1 - U_{bus_ref}^2 \frac{\dot{\hat{M}} \hat{Q} - \hat{M} \dot{\hat{Q}}}{\hat{Q}^2} - \frac{\dot{\hat{N}} \hat{Q} - \hat{N} \dot{\hat{Q}}}{\hat{Q}^2} \quad (12)$$

利用不变性条件, 等效控制量可表示为如下形式:

$$u_{eq} = \frac{\hat{Q} + K_1 L \tilde{x}_1}{\hat{x}_2} + \frac{L \gamma_2 \tilde{x}_2 \hat{Q} + L \gamma_3 \tilde{x}_1 x_2 \hat{N}}{\hat{Q}^2 x_2 \hat{x}_2} + \frac{L U_{bus_ref}^2 (\gamma_1 x_2 \tilde{x}_2 \hat{Q} + \gamma_3 \tilde{x}_1 \hat{M})}{\hat{Q}^2 \hat{x}_2} \quad (13)$$

其中, u_{eq} 为离散输入函数的平滑函数。根据等效控制的概念和滑模运动的充要条件, 有:

$$0 < u_{eq} < 1 \quad (14)$$

因此, 可得:

$$0 < \hat{Q} + K_1 L \tilde{x}_1 + \frac{L \hat{N} \hat{Q} - L \hat{N} \dot{\hat{Q}}}{\hat{Q}^2} - \frac{L U_{bus_ref}^2 (\hat{M} \hat{Q} - \hat{M} \dot{\hat{Q}})}{\hat{Q}^2} < \hat{x}_2 \quad (15)$$

由于所选切换函数为时变滑模面, 有别于传统的定长滑模面, 其切换函数的参数是自适应、时变的, 因此只要选择适当的初始条件, 满足:

$$\begin{cases} \hat{x}_2(0) > 0, \hat{Q}(0) > 0, \hat{M}(0) > 0 \\ S(0) = \hat{x}_1(0) - x_{1_ref}(0) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

则系统在 $t=0$ 时刻就处在滑动模态, 即系统状态

变量一开始就在滑模面上滑动。随后保持在滑模面上, 并且不断向期望状态滑动, 实现快速、准确地全程 SMC, 也就是对于控制系统而言始终有: $\dot{S}=0$ 。

2.3 定频 PWM-ASMC 器

SMC 因其自身变结构特性与变换器特性相符, 得以应用于本文中。但 SMC 的弊端在于存在变频和抖振的问题, 通过 ASMC 能有效地改善抖振的问题。对于变频的问题, 一种解决方法是增加额外的硬件电路来固定开关频率; 另一种方法是将 SMC 与其他控制方法相结合。由于本文采用的微电网模型为大信号模型, 常规 PWM 电压/电流控制方法, 虽然能固定开关频率, 但无法适用于大信号工作条件, 也不能对输入和负载变化表现出绝对的鲁棒性。因此本文将 PWM 控制与 SMC、自适应控制方法相结合, 取长补短, 在克服输入输出变化与未知的同时, 也解决了控制器无法实现的难题, 使得控制器在各种可能的工况下达到最优的性能^[23-25]。

定频 PWM-ASMC 形式上相当于含 PWM 的电压电流双环控制, 所不同的是 PWM-ASMC 不需要小信号建模, 更不需要用控制领域的幅频特性来设计控制参数, 相对而言设计简单, 而且它是对系统大信号建模所得出的控制方法, 对于大范围扰动也同样适用。PWM-ASMC 定频原理与传统 PWM 类似, 通过固定三角波信号的频率, 使输出开关信号的频率固定。为了实现对双向 Buck/Boost 变换器的 PWM-ASMC, 需要将平滑函数 u_{eq} 转换为变换器所需的瞬时占空比 D ^[26], 然后再作用于双向 Buck/Boost 变换器, 实现对微电网系统的定频 PWM-ASMC。

2.4 控制系统结构

微电网控制系统结构, 如图 4 所示。其由四部分组成: 双向 Buck/Boost 变换器与负载构成的微电网模型、自适应观测器、ASMC 器以及 PWM 发生器。

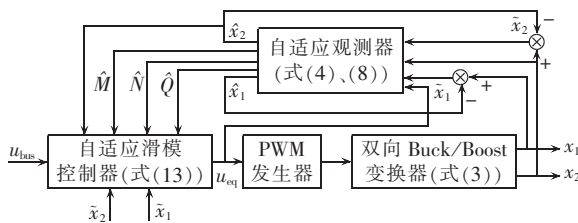


图 4 控制框图

Fig.4 Block diagram of control

2.5 稳定分析

命题: 在滑动模态时, 由式(3)—(5)、(8)和(13)组成的微电网闭环控制系统是渐进稳定的, 状态变量 x_1, x_2 收敛于期望平衡点 I_{L_ref}, U_{bus_ref} 。具体证明如下。

将 $x_1 = \tilde{x}_1 + \hat{x}_1, x_2 = \tilde{x}_2 + \hat{x}_2$, 式(8)、(13)及 $\dot{S}(\mathbf{x})=0$ 代入式(4)中可得:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 = & \frac{1}{C\hat{x}_2} \left(U_{\text{bus_ref}}^2 \hat{M} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^4 \gamma_1 x_2 \tilde{x}_2 \hat{M}}{\hat{Q}^2} + \right. \\ & K_1 L \tilde{x}_1 \frac{\hat{N}}{\hat{Q}} + \hat{N} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^4 \gamma_3 \tilde{x}_1 \hat{M}}{\hat{Q}^3} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_2 \tilde{x}_2 \hat{M}}{\hat{Q}^2 x_2} + \\ & \frac{L \gamma_2 \hat{N} \tilde{x}_2}{\hat{Q}^2 x_2} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \hat{N} \gamma_3 \tilde{x}_1 \hat{M}}{\hat{Q}^3} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_1 x_2 \tilde{x}_2 \hat{N}}{\hat{Q}^2} + \\ & \left. \frac{L \gamma_3 \tilde{x}_1 \hat{N}^2}{\hat{Q}^3} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_3 \tilde{x}_1 \hat{M} \hat{N}}{\hat{Q}^3} + U_{\text{bus_ref}}^2 K_1 L \tilde{x}_1 \frac{\hat{M}}{\hat{Q}} \right) - \\ & \frac{\hat{M}(\tilde{x}_2 + \hat{x}_2)}{C} - \frac{\hat{N}}{C(\tilde{x}_2 + \hat{x}_2)} + K_2 \tilde{x}_2 \end{aligned} \quad (17)$$

因此,可得:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 \hat{x}_2 = & \frac{\hat{M}}{C} (U_{\text{bus_ref}}^2 - \hat{x}_2^2) + \frac{1}{C} \left(U_{\text{bus_ref}}^2 K_1 L \frac{\hat{M}}{\hat{Q}} + K_1 L \frac{\hat{N}}{\hat{Q}} + \right. \\ & \frac{LU_{\text{bus_ref}}^4 \gamma_3 \hat{M}^2}{\hat{Q}^3} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \hat{N} \gamma_3 \hat{M}}{\hat{Q}^3} + \\ & \left. \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_3 \hat{M} \hat{N}}{\hat{Q}^3} + \frac{L \gamma_3 \hat{N}^2}{\hat{Q}^3} \right) \tilde{x}_1 + \\ & \frac{1}{C} \left(\frac{LU_{\text{bus_ref}}^4 \gamma_1 x_2 \hat{M}}{\hat{Q}^2} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_2 \hat{M}}{\hat{Q}^2 x_2} - \hat{M} \hat{x}_2 + \right. \\ & \left. \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_1 x_2 \hat{N}}{\hat{Q}^2} + \frac{L \gamma_2 \hat{N}}{\hat{Q}^2} + K_2 C \hat{x}_2 \right) \tilde{x}_2 + \\ & \frac{1}{C} \left(\hat{N} - \frac{\hat{N} \hat{x}_2}{\tilde{x}_2 + \hat{x}_2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

将式(18)转换后可得:

$$\frac{d\hat{x}_2^2}{dt} = \frac{2\hat{M}}{C} (U_{\text{bus_ref}}^2 - \hat{x}_2^2) + \psi + h \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \psi = & \frac{2}{C\hat{Q}} \left(U_{\text{bus_ref}}^2 K_1 L \hat{M} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^4 \gamma_3 \hat{M}^2}{\hat{Q}^2} + \right. \\ & K_1 L \hat{N} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \hat{N} \gamma_3 \hat{M}}{\hat{Q}^2} + \frac{LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_3 \hat{M} \hat{N}}{\hat{Q}^2} + \frac{L \gamma_3 \hat{N}^2}{\hat{Q}^2} \left. \right) \tilde{x}_1 + \\ & \frac{2}{C\hat{Q}^2} \left(LU_{\text{bus_ref}}^4 \gamma_1 x_2 \hat{M} + L \gamma_2 \hat{N} + LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_2 \frac{\hat{M}}{x_2} + \right. \\ & \left. LU_{\text{bus_ref}}^2 \gamma_1 x_2 \hat{N} - \hat{M} \hat{x}_2 \hat{Q}^2 + K_2 C \hat{x}_2 \hat{Q}^2 \right) \tilde{x}_2 \\ h = & \frac{2}{C} \left(\hat{N} - \frac{\hat{N} \hat{x}_2}{\tilde{x}_2 + \hat{x}_2} \right) \end{aligned}$$

因为 $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2$ 收敛于 0, 所以 ψ 与 h 收敛于 0。因此, $\hat{x}_2$ 收敛于 $\pm U_{\text{bus_ref}}$, 但根据式(15)的条件 $\hat{x}_2 > 0$, 故 $\hat{x}_2$ 与 x_2 渐进收敛于 $U_{\text{bus_ref}}$ 。将式(13)代入式(3)中,

可得 x_{1_ref} 收敛于 I_{L_ref} , 因此 $\hat{x}_1$ 与 x_1 收敛于 I_{L_ref} 。

3 仿真分析

为了验证所提微电网控制器的有效性, 在 MATLAB 中搭建仿真电路, 具体参数如下: 母线参考电压 $U_{\text{bus_ref}} = 380 \text{ V}$, 蓄电池标称电压 $u_s = 300 \text{ V}$, 电容 $C = 1000 \mu\text{F}$, 电感 $L = 5 \text{ mH}$, 功率管开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$, 电阻 $R = 100 \Omega$ 。

令 $K_1 = K_2 = 685$, 自适应增益 $\gamma_1 = 3, \gamma_2 = 150, \gamma_3 = 150$ 。初始条件的选择如下: $\hat{x}_2(0) = 365 \text{ V}, \hat{Q}(0) = 303 \text{ V}, \hat{M}(0) = 10^{-2} \text{ S}, \hat{N}(0) = -4000 \text{ W}, \hat{x}_1(0) = -8.44 \text{ A}$ (电池初始状态处于充电状态), 使得 $t = 0$ 时刻, 就发生滑动模态, 此时 $S(0) = 0$ 。

分布式电源和 CPLs 是影响微电网稳定运行的主要因素, 本文中集总功率按图 5 所示 4 步变化。

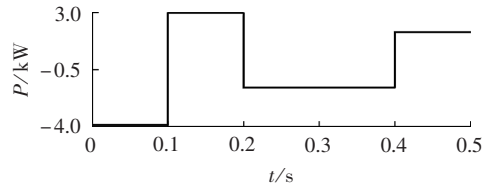


图 5 功率变化图

Fig.5 Diagram of power changing

3.1 HB-SMC

HB-SMC 条件下, 系统采用 SMC 方式, 用滞环方法限制开关频率, 其仿真结果如图 6—8 所示。从图 6 可以看出, 在 CPLs 冲击下, 母线电压在 20 ms 内能跟踪上参考值, 电压波动范围在 $-1.2\% \sim 1.6\%$ 之间, 并且存在抖振现象。虽然调节时间较长, 但却能够确保直流电压在允许范围内波动。从图 7 可知, 电感电流虽然能够很快跟踪参考值, 但当 CPLs 突变时, 阶跃电流较大。HB-SMC 限频方法采用滞环法, 虽然解

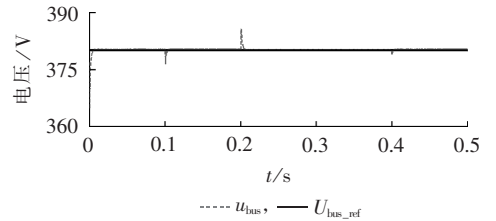


图 6 基于 HB-SMC 的直流母线电压波形

Fig.6 Waveform of DC bus voltage under HB-SMC

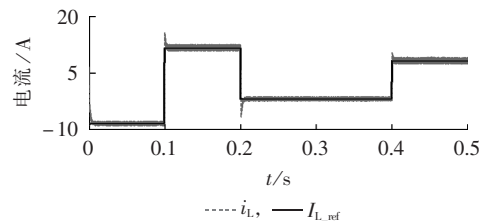


图 7 基于 HB-SMC 的电感电流波形

Fig.7 Waveform of inductive current under HB-SMC

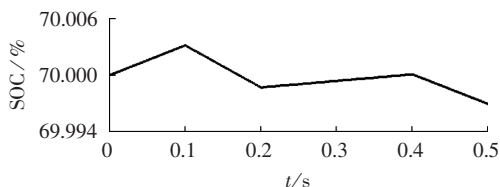


图 8 基于 HB-SMC 的电池充放电状态

Fig.8 Waveform of SOC under HB-SMC

决了开关频率过高的难题,但解决不了频率不固定的问题,开关频率剧烈变化会使得输入输出滤波器设计过程变得困难。图 8 为直流系统内起支撑作用的蓄电池充放电状态图,当功率流动方向为从电池到直流母线时($P>0$),电池处于放电状态;反之,当能量流动方向为从直流母线到蓄电池时($P\leq 0$),电池处于充电状态。

3.2 定频 PWM-ASMC

本文所提控制条件下,微电网系统母线电压响应波形如图 9 所示。可见,当参考母线电压为 380 V 时,在 CPLs 突变冲击下,母线电压波动范围为 $-1\%\sim 1.3\%$ 。对比图 6,所提方法的母线电压波动范围减少了 0.5%,因此 ASMC 器很好地确保了母线电压在允许范围内波动,维持了系统电压的稳定;由于初始状态选择适当,系统在 $t=0$ 时刻就处在滑动模态,直至过程消失,系统全程处于滑动模态;由于在 CPLs 突变冲击下,母线电压在 8 ms 内跟踪到参考电压,电压调节时间较 HB-SMC 方法缩短了 12 ms,并且母线电压的光滑度更大,抖振现象得到了明显改善。如图 10 所示,电感电流在 CPLs 突变瞬间,能够很好地跟随参考电流的变化。对比图 7,图 10 中阶跃电流明显降低,并且快速调节到参考值;电感电流变光滑,抖振现象有所改善。因此,当采用定频 PWM-ASMC 时,系统状态变量全程都被很好地维持在滑模面上,动态响应和暂态值都得到了很好地改善。电池的充放电状态如图 11 所示,其与图 8 的变化趋势相吻合,当 $P\leq 0$ 时,电池处于充电状态,反之,则处于放电状态。并且,因所采用方法中运用了 PWM 定频技术,故开关频率被固定为与三角波载波频率相同,简化了滤波器的设计难度。

上述仿真结果表明,本文采用的定频 PWM-ASMC 方法能够在参数不确定和 CPLs 突变的情况下,很好

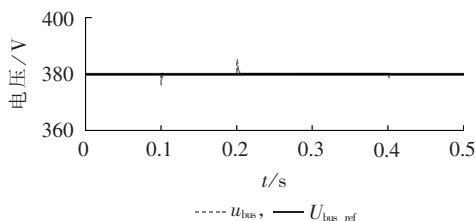


图 9 基于 PWM-ASMC 的直流母线电压波形

Fig.9 Waveform of DC bus voltage under PWM-ASMC

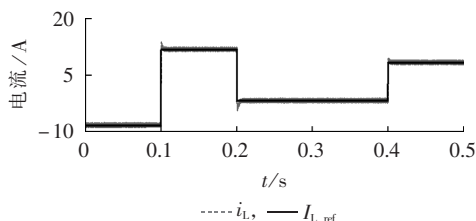


图 10 基于 PWM-ASMC 的电感电流波形

Fig.10 Waveform of inductive current under HB-ASMC

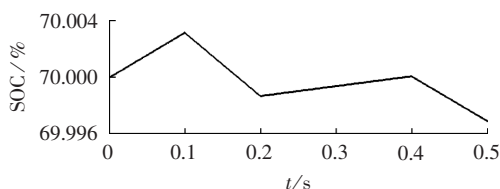


图 11 基于 PWM-ASMC 的电池充放电状态

Fig.11 Waveform of SOC under HB-ASMC

地保证直流母线电压的快速调节和系统的稳定。同时,仿真结果也表明,所提控制器对大扰动具有很好的鲁棒性。仿真结果与理论分析保持高度一致。

4 结论

本文提出的应用于孤岛直流微电网的定频 PWM-ASMC 方法,在无需增加额外的传感器/硬件电路或是通信系统的情况下,能够实现对直流母线电压的快速跟踪与稳定控制。所提控制方法为微电网系统的扩展与系统内源、荷的即插即用提供了新的解决办法。本文运用 ASMC 方法估测不确定量与外部扰动,系统参数和开关切换函数被不断调整,从而降低了抖振现象;定频率 PWM 的应用使得系统开关频率恒定,极大地降低了滤波器的设计难度;所提控制方法对于大扰动具备很好的鲁棒性。除此之外,所提控制方法对简化微电网控制系统的设计、降低微电网建设的工程成本都是很有帮助的。本文为了方便控制器的设计,简化了系统电路,为了更加逼近实际工程,可考虑采用更加复杂的微电网模型。

参考文献:

- [1] 张丹,王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 451-458.
ZHANG Dan, WANG Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 451-458.
- [2] MAHMOUD M S, RAHMAN M S U, FOUAD M A L S. Review of micro-grid architectures—a system of systems perspective[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(8): 1064-1078.
- [3] MAGNE P, NAHID-MOBARAKEH B, PIERFEDERICI S. Dynamic consideration of DC microgrids with constant power loads and active damping system—a design method for fault-tolerant stabilizing system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 562-570.

- [4] HAMZEH M,KARIMI H,MOKHTARI H. A new control strategy for a multi-bus MV microgrid under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(4):2225-2232.
- [5] AHMADI R,FERDOWSI M. Improving the performance of a line regulating converter in a converter-dominated DC microgrid system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(5):2553-2563.
- [6] YU K,AI Q,WANG S,et al. Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(2):695-705.
- [7] SINGH S,FULWANI D,KUMAR V. Robust sliding-mode control of DC/DC boost converter feeding a constant power load[J]. IET Power Electronics,2015,8(7):1230-1237.
- [8] 杨忠林,查晓明,孙建军,等. 基于反馈线性化的直流微电网全局稳定方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):10-14.
YANG Zhonglin,ZHA Xiaoming,SUN Jianjun,et al. Global stabilization based on feedback linearization for DC micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):10-14.
- [9] CUCUZZELLA M,INCREMENTA G P,FERRARA A. Design of robust higher order sliding mode control for microgrids[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2015,5(3):393-401.
- [10] GUDEY S K,GUPTA R. Recursive fast terminal sliding mode control in voltage source inverter for a low-voltage microgrid system[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2016, 10(7):1536-1543.
- [11] TAHIM A P N,PAGANO D J,PONCE E. Nonlinear control of DC-DC bidirectional converters in stand-alone DC microgrids [C]//2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control(CDC). Maui,Hawaii,USA:IEEE,2012:3068-3073.
- [12] BENADERO L,CRISTIANO R,PAGANO D J,et al. Nonlinear analysis of interconnected power converters:a case study[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,2015,5(3):326-335.
- [13] 苏小玲,韩民晓,孙海. 基于自适应全局滑模控制的微电网稳定控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5534-5541.
SU Xiaoling,HAN Minxiao,SUN Hai. Stability control strategy for microgrid based on adaptive total sliding-mode control[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(31):5534-5541.
- [14] TAN S C,LAI Y M,TSE C K,et al. A fixed-frequency pulse width modulation based quasi-sliding-mode controller for buck converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005, 20(6):1379-1392.
- [15] LU X,SUN K,GUERRERO J M,et al. Stability enhancement based on virtual impedance for DC microgrids with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(6): 2770-2783.
- [16] NOBREGA T A P,PAGANO D J,LENZ E,et al. Modeling and stability analysis of islanded DC microgrids under droop control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(8): 4597-4607.
- [17] DIAZ N L,DRAGIĆEVIĆ T,VASQUEZ J C,et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids—a new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(5):2476-2485.
- [18] 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.
- [19] GAUTAM A R,SINGH S,FULWANI D. DC bus voltage regulation in the presence of constant power load using sliding mode controlled DC-DC bi-directional converter interfaced storage unit[C]//2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids(ICDCM). Atlanta,USA:IEEE,2015:257-262.
- [20] 任丽娜,李江艳,刘福才. 风力发电机侧整流器非线性自适应 Backstepping 控制[J]. 太阳能学报,2014,35(8):1336-1343.
REN Lina,LI Jiangyan,LIU Fucui. Nonlinear adaptive Backstepping control for rectifier in wind generator side[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2014,35(8):1336-1343.
- [21] SUBUDHI B,GE S S. Sliding-mode-observer-based adaptive slip ratio control for electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2012,13(4):1617-1626.
- [22] 肖烨然,刘刚,宋欣达,等. 基于改进滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器 I/F 起动方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):95-102.
XIAO Yeran,LIU Gang,SONG Xinda,et al. Sensorless I/F startup based on modified sliding mode observer for PMSM [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):95-102.
- [23] BAEK J,JIN M,HAN S. A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(6):3628-3637.
- [24] 杨小龙,程启明,褚思远,等. 孤岛模式下光储直流微电网变功率控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):67-81.
YANG Xiaolong,CHENG Qiming,ZHU Siyuan,et al. Multi-core parallel progressive optimization algorithm for mid-/long-term generation dispatch of hydropower system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(11):67-81.
- [25] HE Y,LUO F L. Design and analysis of adaptive sliding-mode-like controller for DC-DC converters[J]. IEE Proceedings—Electric Power Applications,2006,153(3):401-410.
- [26] VENKATARAMANAN R,SABANOVIC A,CUK S. Sliding mode control of DC-to-DC converters[C]//Proceedings IECON. San Francisco,USA:IEEE,1985:251-258.

作者简介:



张 丹

张 丹(1985—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,主要研究方向为微电网建模与控制(**E-mail**:nicolezhang1985@126.com);

王 杰(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统非线性控制与稳定分析、自适应控制、鲁棒控制(**E-mail**:jiwangxh@sjtu.edu.cn);

弥 潇(1991—),女,陕西西安人,博士研究生,主要研究方向为电力系统非线性控制与稳定分析(**E-mail**: nixiao0702@163.com)。

(下转第 217 页 continued on page 217)

Development of electricity information acquisition system based on Beidou short message communication

ZHOU Wenting¹, WANG Tao¹, YUAN Mingfeng², WANG Lifu², CHEN Yuqing³, XIA Na³

(1. Information and Communication Company, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumchi 830002, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumchi 830002, China;
3. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In remote areas without public network coverage, the electricity information acquisition is a historic technical problem. An electricity information acquisition system based on Beidou short message communication is developed. The developed data collection and transmission equipment can collect electricity data in multiple modes, and carry out data segmentation, Beidou protocol packet and remote transmission. Meanwhile, the main station equipment can implement Beidou short message receiving, data parsing and packet reassembly & patching. The testing results show that the success ratio of electricity information acquisition of the developed system can reach 98.9%, so it can be used as an efficient and reliable solution for the electricity information acquisition in remote areas.

Key words: electricity information acquisition; Beidou short message; STM32; data segmentation; data compression; communication

.....

(上接第 143 页 continued from page 143)

Adaptive sliding mode control strategy for DC microgrid

ZHANG Dan, WANG Jie, MI Xiao

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to improve the stability of microgrid, a novel fixed-frequency PWM-based adaptive sliding mode control strategy is proposed, which combines the adaptive observer technology and sliding mode control method with fixed-frequency PWM-based technology. The proposed strategy is able to quickly track and regulate state variables without any additional sensors/hardware circuits, which is beneficial for the scalability and plug-play of the distributed generators and loads in DC microgrid, and can simplify the design of filters. Moreover, the nonlinear complex control method is adopted to maintain the stability of the bus voltage and the entire system under sudden changes of constant power loads. The reasonable selection of the initial state and design of the switching surface contribute to the state variables operating in sliding mode all the time, and can relieve chattering phenomenon. The DC microgrid simulation environment including photovoltaic, fuel cell, storage battery, bi-directional Buck/Boost converter, constant power load and resistance load verifies the validity of the proposed strategy.

Key words: DC microgrid; fixed-frequency PWM-based sliding mode control; adaptive observer; constant power load; bi-directional Buck/Boost converter