

基于数据驱动的孤岛直流微电网二次控制

米 阳,常俊飞,时 帅,蔡鹏程,付起欣,王育飞,刘蓉晖,姜恩宇

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:针对孤岛直流微电网,提出一种数据驱动的无模型二次控制策略。利用直流微电网系统输入、输出的过程数据以及偏格式动态线性化方法建立系统的数据模型。通过设计新型的无模型二次功率和电压控制器,分布式电源按其容量成比例地输出功率,同时使用最大电压补偿的方法恢复系统母线电压。通过数学分析严格证明该直流微电网系统在不同运行条件下是闭环控制稳定的。最后,利用MATLAB/Simulink仿真和RTDS实验平台,验证了所提控制策略的有效性。

关键词:直流微电网;电压恢复;功率分配;数据驱动;无模型自适应控制

中图分类号:TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105038

0 引言

微电网是提高非化石能源在一次能源中的占比、解决新能源消纳问题的有效途径^[1-3]。相比于交流微电网,直流微电网系统内不存在频率、相位和无功功率等问题^[4-6],因此对直流微电网进行研究具有重要的现实意义。

分层控制作为微电网的主要控制方式得到了广泛的研究^[7]。分层控制由一次控制、二次控制和三次控制组成,其中一次控制遵循下垂规律,具有快速响应的特点;二次控制可以提高控制精度;在并网模式下,三次控制负责微电网与主网之间的功率流动并实现经济运行。当直流微电网孤岛运行时,二次控制用于补偿由一次下垂控制引起的电压偏差和功率分配误差。传统的二次控制是基于先验的精确模型的^[8-10]。文献[8]提出了基于多智能体的微电网二次电压控制,但是其需要微电网模型和一次控制的参数信息。文献[9]设计了基于观测器的电压下垂和电流反馈的二次控制,但是其需要微电网的精确模型参数,而且系统结构或参数的改变都会影响控制效果甚至使观测器失效。文献[10]提出了一种基于Lyapunov第二定律的二次控制,但是其Lyapunov函数的构造仍需要精确的微电网模型参数。以上控制虽然都实现了二次控制的目标,但在网络拓扑、线路阻抗和负载的详细参数未知的情况下,无法建立精确的微电网模型。

为了降低控制器的设计对系统模型的依赖,数据驱动无模型控制方法得到了广泛关注^[11-13]。文献

[11]针对交直流微电网的互联变换器,设计了基于数据驱动的内环电压控制器,但是其二次控制本质上仍是PI控制器。文献[12]提出了一种非线性多模型自适应控制的二次电压控制方法,实现了精确的电压跟踪,但是未考虑线路阻抗对功率的影响,这可能导致发电机过载。文献[13]提出一种无模型滑模二次控制器,但是滑模控制不可避免地存在抖振问题。文献[14]使用平均电压和平均功率的方法设计了基于PI的二次控制器,但是仍需要微电网的模型信息设计控制器参数。现有的二次控制方法大多基于PI控制器^[14-17],通常会存在较高的超调、对控制参数过于灵敏和应对干扰迟钝等问题。

综上所述,本文结合无模型自适应控制算法,提出一种数据驱动的孤岛直流微电网无模型二次控制策略,利用系统运行中测量的数据在线设计二次控制。其中二次控制的目标是实现分布式电源DG(Distributed Generation)按其容量成比例地输出功率,并在不引入母线电压反馈的情况下恢复母线电压。同时,利用最大电压补偿的方法^[17]有效补偿负荷和线路阻抗上的电压降落。在不依赖于微电网拓扑、线路阻抗和负载需求的前提下,所提的方法本质上是无模型的,能够在不同控制层之间进行独立二次控制设计,增强了针对不确定性的鲁棒性。此外,本文还通过仿真验证了所提控制策略在应对通信延迟、通信噪声和冲击负荷方面的有效性。

1 直流微电网分层控制

孤岛直流微电网的分层控制结构图如图1所示。图中, E_i^* 和 F^* 为二次控制器的输出量, E_i^* 用于矫正 DG_i 的输出功率误差, F^* 用于消除母线电压偏差; p_i 和 v_{o-i} ($i=1,2,\dots,n$)分别为 DG_i 的输出功率和输出电压, n 为DG的个数; v_{o-i}^* 为 DG_i 的输出电压参考值。首先,无模型二次控制器计算和输出 E_i^* 及 F^* 并分配给各DG的本地一次控制器;然后,一次下垂

收稿日期:2021-01-30;修回日期:2021-04-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1503001);上海市科技创新行动计划项目(18020500700)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB1503001) and Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan(18020500700)

控制计算 v_{o-i}^* ;最后,测量 DG 的输出功率 p_i 和输出电压 v_{o-i} 并反馈到二次控制器。

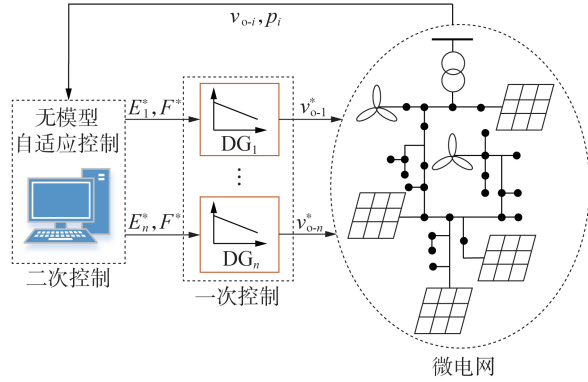


图1 孤岛直流微电网分层控制结构图

Fig.1 Structure diagram of hierarchical control for islanded DG microgrid

基于模型的二次控制需要一次控制的参数和微电网系统的模型^[8-10],这降低了控制的灵活性和系统的可靠性。为此,本文设计基于数据驱动的直流微电网无模型二次控制,其不需要一次控制的先验知识及微电网系统的模型信息,提高了系统的鲁棒性。使用DC/DC变换器的微电网一次控制及内部控制如图2所示。图中, R_f 、 L_f 和 C_f 分别为滤波器等效电阻、电感和电容; R_{line-i} 和 L_{line-i} 分别为 DG_i 所在线路等效电阻和电感; i_L 为电感电流。

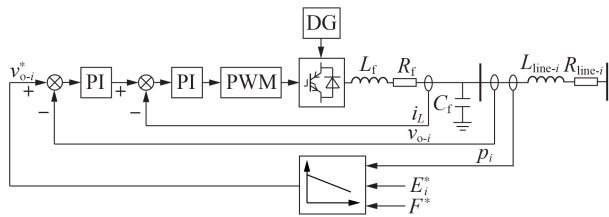


图2 基于DC/DC变换器的微电网控制框图

Fig.2 Control block diagram of microgrid based on DC/DC converter

因此,图2所示的微电网系统可以建立如下输入-输出模型:

$$\begin{cases} p(t) = f_1(p(t), E^*(t)) \\ v_o(t) = f_2(v_o(t), F^*(t)) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ 和 $v_o = [v_{o-1}, v_{o-2}, \dots, v_{o-n}]^T$ 分别为微电网的输出功率向量和输出电压向量; $E^* = [E_1^*, E_2^*, \dots, E_n^*]^T$ 和 $F^* = [F^*, F^*, \dots, F^*]^T$ 分别为功率控制输入向量和电压控制输入向量; $f_j(\cdot)$ ($j=1, 2$) 为微电网系统模型函数,是未知的。

2 数据驱动二次控制策略

目前非线性系统的控制大多是基于模型的,但是在微电网系统中,非线性、模型误差、线路阻抗未知和负荷扰动总是存在的^[12],模型的不确定性对直

流微电网系统的功率调节和电压稳定都会产生较大的影响。在无法获得微电网系统精确模型的情况下,基于数据驱动的控制方法利用在线测量的电压和功率数据设计控制器,降低了直流微电网系统二次控制对精确数学模型的依赖。

2.1 直流微电网系统的动态线性化建模

通过在线测量DG输出电压和功率的数据,将模型(式(1))离散化可得:

$$\begin{cases} p(k+1) = f_1(p(k), p(k-1), \dots, p(k-n_1), \\ E^*(k), E^*(k-1), \dots, E^*(k-n_1)) \\ v_o(k+1) = f_2(v_o(k), v_o(k-1), \dots, v_o(k-n_2), \\ F^*(k), F^*(k-1), \dots, F^*(k-n_2)) \end{cases} \quad (2)$$

其中, n_1 和 n_2 为系统的阶数,是2个未知正整数。

为了便于描述,令 $y_1 = p$ 、 $y_2 = v_o$ 、 $u_1 = E^*$ 、 $u_2 = F^*$, 则模型(式(2))可以表示为:

$$\begin{aligned} y_j(k+1) &= f_j(y_j(k), y_j(k-1), \dots, y_j(k-n_j), \\ &u_j(k), u_j(k-1), \dots, u_j(k-n_j)) \quad j=1, 2 \end{aligned} \quad (3)$$

使用偏格式动态线性化PFDL(Partial Form Dynamic Linearization)方法^[18]将系统(式(3))等价转换为一种采用增量形式的动态数据模型并给出如下假设。假设1:系统(式(3))控制输入 $u_j(k)$ 的偏导数是连续的。假设2:系统(式(3))满足广义Lipschitz条件,即对于任意的2个时刻 k_1 和 k_2 , $k_1 \neq k_2$, $k_1 \geq 0$, $k_2 \geq 0$, $\bar{U}_j(k_1) \neq \bar{U}_j(k_2)$, 有式(4)成立。

$$\|y_j(k_1+1) - y_j(k_2+1)\| \leq b \|\bar{U}_j(k_1) - \bar{U}_j(k_2)\| \quad (4)$$

$$\bar{U}_j(k) = [U_L^1(k), U_L^2(k), \dots, U_L^n(k)]^T$$

$$U_L(k) = [u(k), u(k-1), \dots, u(k-L+1)]^T$$

其中, b 为一个常数,且 $b > 0$; L 为动态线性化常数; $U_L(k)$ 为一个滑动时间窗口 $[k-L+1, k]$ 内 L 个时刻的控制输入数据组成的列向量; $\bar{U}_j(k)$ 为第 j 个模型 L 个时刻所有一次控制输入数据组成的分块矩阵; $u(k)$ 为一次控制输入(即 E_i^* 或 F^*)。

从实际角度出发,上述假设是合理的:假设1是控制系统设计中对一般非线性系统的一种典型约束条件;假设2是对系统输入和输出变化率上界的一种限制。在系统工作点附近,如果 E_i^* 和 F^* 的变化率有界,那么系统输出 p_i 和 v_{o-i} 的变化率不可能趋于无穷大。

定理1^[18]:对于满足假设的非线性系统(式(3)),当 $\|\Delta \bar{U}(k)\| \neq 0$ 时,一定存在一个伪偏导数PPD(Pseudo Partial Derivative)矩阵 $\Phi(k)$,使得系统(式(3))可以转化为动态线性化模型,如式(5)所示。

$$\Delta y_j(k+1) = \Phi_j^T(k) \Delta \bar{U}_j(k) \quad (5)$$

$$\Delta y_j(k+1) = y_j(k+1) - y_j(k)$$

$$\Delta \bar{U}_j(k) = \bar{U}_j(k) - \bar{U}_j(k-1) =$$

$$[\Delta U_L^1(k), \Delta U_L^2(k), \dots, \Delta U_L^n(k)]^T$$

$$\Delta U_L(k) = [\Delta u(k), \Delta u(k-1), \dots, \Delta u(k-L+1)]^T$$

$$\Phi_j(k) = \begin{bmatrix} \phi_L^1(k) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \phi_L^2(k) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \phi_L^n(k) \end{bmatrix}$$

$$\phi_L(k) = [\phi_1(k), \phi_2(k), \cdots, \phi_L(k)]^T$$

其中, $\phi_1(k)$ 、 $\phi_2(k)$ 、 $\cdots$ 、 $\phi_L(k)$ 为系统的 PPD 向量的元素。

直流微电网系统的 PFDL 模型(式(5))是一种数据的模型,可以通过严格的数学分析证明其存在性^[18]。 $\Phi(k)$ 为 PPD 矩阵,代表系统的模型动态,对系统的时滞和时变参数不敏感。PFDL 的建模过程避免了直流微电网二次控制设计过程中需要系统模型参数的问题,是数据驱动无模型二次控制设计过程中的重要步骤。

2.2 无模型二次功率和电压控制

基于式(5)所示的直流微电网 PFDL 模型,以第 j 个模型的 DG_i 为例设计无模型二次控制器。设 $y^*(k+1)$ 为系统期望输出,即 DG 输出功率或电压的期望值。为了消除系统输出的跟踪误差,设计如下控制输入准则函数:

$$J(u(k)) = |y^*(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda |u(k) - u(k-1)|^2 \quad (6)$$

其中, $\lambda > 0$ 为权重因子,用于限制控制输入 $u(k)$ 的变化率,不仅可用来防止分母为 0,还可抑制系统超调。

当 $J(u(k))$ 等于最小值 0 时,代表系统到达稳态, DG 输出电压或功率等于期望值。将模型(式(5))代入准则函数(式(6)),对 $u(k)$ 求导并令 $J'(u(k)) = 0$, 得到 $u(k)$ 求解算法如下:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_1 \phi_1(k)(y^*(k+1) - y(k))}{\lambda + |\phi_1(k)|^2} - \frac{\phi_1(k) \sum_{m=2}^L \rho_m \phi_m(k) \Delta u(k-m+1)}{\lambda + |\phi_1(k)|^2} \quad (7)$$

$$\Delta u(k-m+1) = u(k-m+1) - u(k-m)$$

其中, $\rho_m \in (0, 1)$ ($m = 1, 2, \cdots, L$) 为比例因子,使算法更加灵活。

系统的 PPD 向量 $\phi_L(k)$ 的行为特性非常复杂且难以直接获取,因此使用系统输入输出数据对其进行估计。系统数据在采样和传输过程中可能会受到干扰,为了防止 PPD 对采样数据过于敏感,设计如下 PPD 估计函数:

$$J(\phi_L(k)) = |y(k) - y(k-1) - \phi_L^T(k) \Delta U_L(k-1)|^2 + \mu \|\phi_L(k) - \hat{\phi}_L(k-1)\|^2 \quad (8)$$

其中, $\mu > 0$ 为权重因子,用于将 PPD 估计值的变化限制在合理的范围内,从而使系统的动态特性得到更好的显现,以提高估计精度。

对 $\phi_L(k)$ 求极值,并令 $J'(\phi_L(k)) = 0$, 得到 PPD 估计算法如下:

$$\hat{\phi}_L(k) = \hat{\phi}_L(k-1) + \eta \Delta U_L(k-1) \times \frac{y(k) - y(k-1) - \hat{\phi}_L^T(k-1) \Delta U_L(k-1)}{\mu + \|\Delta U_L(k-1)\|^2} \quad (9)$$

其中, $\eta \in (0, 2]$ 为用于调节的步长因子,目的是提高算法的灵活性并满足稳定性分析的要求; $\hat{\phi}_L(k)$ 为 $\phi_L(k)$ 的估计值。

结合输入算法和 PPD 估计算法可得直流微电网系统二次控制算法为:

$$\hat{\phi}_L(k) = \hat{\phi}_L(k-1) + \eta \Delta U_L(k-1) \times \frac{y(k) - y(k-1) - \hat{\phi}_L^T(k-1) \Delta U_L(k-1)}{\mu + \|\Delta U_L(k-1)\|^2} \quad (10)$$

$$\hat{\phi}_L(k) = \hat{\phi}_L(1) \quad \|\hat{\phi}_L(k)\| \leq \varepsilon \text{ 或 } \|\Delta U_L(k-1)\| \leq \varepsilon \text{ 或 } \text{sign}(\hat{\phi}_1(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_1(1)) \quad (11)$$

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_1 \hat{\phi}_1(k)(y^*(k+1) - y(k))}{\lambda + |\hat{\phi}_1(k)|^2} - \frac{\hat{\phi}_1(k) \sum_{m=2}^L \rho_m \hat{\phi}_m(k) \Delta u(k-m+1)}{\lambda + |\hat{\phi}_1(k)|^2} \quad (12)$$

其中, ε 为一个充分小的正数; $\hat{\phi}_L(1)$ 为 $\hat{\phi}_L(k)$ 的初值。

重置算法(式(11))是为了提高 PPD 估计算法对时变参数的跟踪能力。当系统经历大的扰动或期望值变化时,如直流微电网系统中出现模型参数变化、负荷投切或者冲击负荷,重置机制生效,使控制器能迅速响应扰动。

为了保证系统控制精度和降低计算量,取 $L = 3$ ^[11]。为了有效补偿负荷和线路阻抗上的电压降落,本文选择 $u_{2-i}(k)$ 中的最大值^[17]作为无模型二次电压控制器的输出,详细的控制框图如图 3 所示,图中 z^{-1} 、 $\cdots$ 、 z^{-n} 表示时间延迟模块,则数据驱动无模型

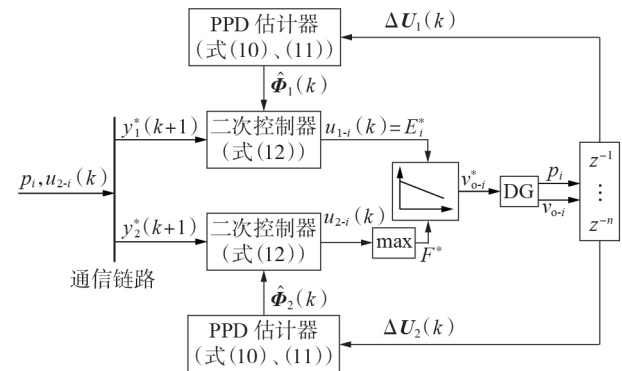


图3 具有无模型二次控制的微电网闭环系统结构图

Fig.3 Structure diagram of closed-loop system for microgrid with proposed model-free secondary control

二次控制器输出为:

$$E_i^*(k) = u_{1-i}(k), F^*(k) = \max(u_{2-i}(k)) \quad (13)$$

2.3 算法实现

数据驱动无模型二次控制算法实现流程见附录A,所提算法实现流程中给出了整体数据驱动无模型二次控制的设计过程。首先测量直流微电网输出功率向量 $\mathbf{p}(k)$ 和电压向量 $\mathbf{v}_o(k)$ 并传输至二次控制器。二次控制的采样频率可在100~1000 Hz之间选择^[19],然后根据测量的数据,通过式(10)估算PPD。重置算法(式(11))可以提高二次控制器对直流微电网中的负荷扰动、参数扰动的灵敏性。通过式(12)和式(13)得到数据驱动无模型二次控制器的输出向量 $\mathbf{E}^*$ 和 $\mathbf{F}^*$ 。算法实现流程中,权重因子 λ 是控制器调节的重要参数,如果 λ 太小会使得算法更新过程中的收敛速度变慢, λ 太大会使得系统输出存在超调; $\eta \in (0, 2]$ 是为了满足稳定性分析的需要;权重因子 $\mu > 0$ 用于限制PPD参数的变化范围并防止估计算法(式(10))分母等于0;动态线性化常数 L 表示使用 L 个时刻点的数据对PPD进行估计,以提高估计精度;比例因子 ρ_m 用于调整不同时刻点数据在当前时刻控制中的影响。

2.4 比例功率分配和电压恢复分析

为了更好地对所提二次控制过程进行分析,使用含有2个DG和1个负荷的直流微电网结构进行分析说明,如图4所示。图中, R_{d-1} 和 R_{d-2} 为虚拟阻抗,即下垂系数; R_{load} 为电阻性负荷; v_{dc} 为母线电压。

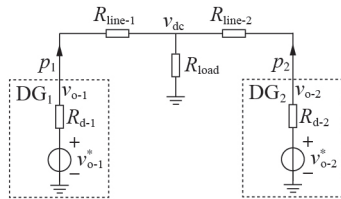


图4 具有2个DG的微电网系统结构图

Fig.4 Structure diagram of microgrid system with two DGs

基于下垂的一次控制如图5所示。定义DG输

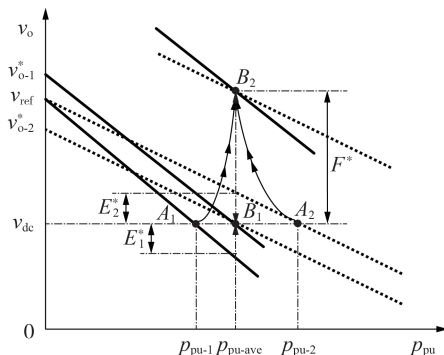


图5 下垂曲线分析

Fig.5 Analysis of droop curve

出的单位功率为 $p_{pu-i} = p_i / p_{rate-i}$,其中 p_{rate-i} 为额定功率,取值为DG的容量;平均单位功率 $p_{pu-ave} = (\sum p_i) / n$ 。当每个DG输出的单位功率都相等且等于平均单位功率,即 $p_{pu-1} = p_{pu-2} = \dots = p_{pu-n} = p_{pu-ave}$ 时,每个DG按其额定容量输出功率。

E_i^* 和 F^* 由无模型二次控制计算得到。由图5可知,一次控制根据控制输入 E_i^* 和 F^* 调整参考电压 v_{o-i}^* ,进而实现系统控制目标。在一次下垂控制下,DG₁和DG₂的工作点分别为点A₁和点A₂。首先,通过动态地调整 E_i^* ,使得系统运行在功率平衡点B₁处,此时DG按其容量成比例地输出功率。 F^* 垂直向上平移下垂曲线,以提高DG的输出电压进而恢复母线电压。由于 F^* 为二次电压控制器输出的最大值,所以可以保证每个DG输出电压的最小值为系统额定参考电压,用这种方式有效地补偿了负荷和线路电阻上的电压降落,此时系统运行在工作点B₂处。因为点B₁和点B₂的单位功率不变,所以 F^* 的加入不会影响到功率分配过程。因这些控制是同时进行的,故DG的工作点直接由点A₁和点A₂移动至点B₂处。

3 稳定性分析

本节将分析使用所提二次控制策略的闭环直流微电网系统的稳定性和系统输出跟踪误差。由式(10)~(12)可以看出,所提数据驱动无模型二次控制策略是通过系统测量数据直接得到控制器的,不需要直流微电网的模型参数,所以从系统输入和输出的角度对闭环系统进行稳定性分析是可行的。

对于非线性的直流微电网,系统维持稳定性仅需要系统输出有界地收敛至稳定的工作点,而不是要求系统输出在无限的时间内渐近收敛。因此,本文分析了闭环受控系统的有界输入有界输出BIBO (Bounded Input Bounded Output)稳定性,可以确保直流微电网系统中所有DG的输出功率和电压都是有界的并且跟踪误差为0,这说明所提控制策略在实际使用中是可行的。为了证明控制器的稳定性,进一步提出如下假设。

假设3^[18]:对于给定的有界期望输出信号 $y^*(k+1)$,总存在一个有界的 $u^*(k)$,使得微电网系统在此控制输入信号作用下,系统输出等于 $y^*(k+1)$ 。需要说明的是,由2.4节的比例功率分配和电压恢复分析可知,控制输入 E_i^* 和 F^* 通过调整下垂曲线进而调整电压环参考电压 v_{o-i}^* 来调整系统工作点。由图5可知,稳定状态下,系统每一个工作点都有一个与之对应的参考电压 v_{o-i}^* ,即存在与之对应的 E_i^* 和 F^* 。本文所提直流微电网系统满足这条假设。

假设4^[18]:对于任意的 k 及 $\|\Delta u_L(k)\| \neq 0$, $\phi_L(k)$ 的第一个元素的符号保持不变,即 $\phi_1(k) > \varepsilon > 0$ 或 $\phi_1(k) < -\varepsilon$ 。需要说明的是,这是对系统控制输入方

向的限制。由图5可知,二次控制通过输出 E_i^* 和 F^* 来调节功率和恢复母线电压。由于下垂控制的固有电压偏差和现实中线路阻抗压降, F^* 一定是大于0的。而对于功率分配,图5中2个DG的下垂曲线(分别对应实线和虚线)的工作点 A_1 和 A_2 在调节功率的过程中,一定是向点 B_1 运动的。对于单个DG的下垂曲线运动的方向是不变的,即 E_i^* 的正负是固定的。

定理2^[18]:针对非线性系统(式(3)),在满足假设1—4的条件下,当 $y^*(k+1)$ 为常数时,采用控制方案(式(10)—(12)),则存在一个正数 $\lambda_{\min}$,使得当 $\lambda > \lambda_{\min}$ 时有:①系统输出跟踪误差是渐近收敛的,且 $\lim_{k \rightarrow \infty} |y^*(k+1) - y(k+1)| = 0$;②闭环系统是BIBO稳定的,即输出向量 $y_j(k)$ 和输入向量 $u_j(k)$ 是有界的。

4 算例分析

为了验证本文所提无模型二次控制的有效性,使用MATLAB/Simulink仿真和RTDS实验平台进行研究,RTDS实验平台见附录B图B1。本文采用的直流微电网结构见图6,3个DG通过DC/DC变换器连接至公共母线,DG₁—DG₃的额定容量之比为1:2:3,变换器控制框图见图2。系统具体参数见附录B表B1。一次控制和二次控制的采样时间分别为 10^{-4} s和0.01 s。无模型二次控制器的功率参考值为 $(p_{\text{rate-}i} / \sum p_{\text{rate-}i}) p_i(k)$,输出电压参考值为系统母线电压额定值,即400 V。

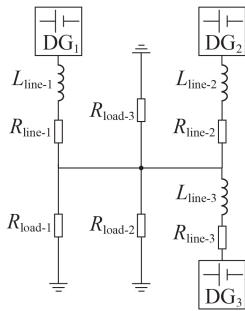


图6 直流微电网结构图

Fig.6 Structure diagram of DC microgrid

本文对孤岛直流微电网系统的不同运行状态进行研究,主要包括6个算例。算例1研究本文所提无模型二次控制的有效性以及对系统扰动的鲁棒性;算例2与文献[14]基于PI的二次控制效果进行对比;算例3—5分别验证无模型二次控制对通信延迟、通信噪声和冲击负荷的鲁棒性;算例6使用RTDS实验平台验证随机负荷扰动的影响。

4.1 算例1:无模型二次控制验证

本算例验证了所提无模型二次控制的有效性,以及对负荷扰动和参数扰动的鲁棒性,系统动态响应如图7所示。

$t \in [0, 2.5)$ s期间系统处于下垂控制状态,负荷

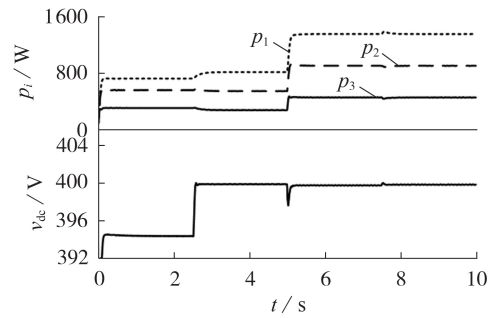


图7 所提控制策略下的系统动态响应

Fig.7 Dynamic response of system under proposed control strategy

功率分配存在误差,这可能导致发电机过载;同时,由于下垂控制的有差特性和线路阻抗上的压降,母线电压无法维持额定值。显然,功率分配误差和母线电压偏差会随着负荷增加而增大。在 $t=2.5$ s时,无模型二次控制器投入系统,DG₁—DG₃按其容量成比例地输出功率,并且有效地恢复了母线电压;在 $t=5$ s时,投入负荷 $R_{\text{load-}2}$;在 $t=7.5$ s时, R_{line} 和 L_{line} 全部减小了25%。由图7可以看出,无模型二次控制对负荷扰动和参数扰动具有较强的鲁棒性。

4.2 算例2:对比基于PI的二次控制

本算例与文献[14]基于PI的直流微电网二次控制效果进行对比。扰动情况与算例1相同,使用文献[14]所提控制的系统动态响应如图8所示。可以看出,基于PI的二次控制可以实现负荷功率的精确分配,但是母线电压存在偏差。此外,对比图7和图8,可以看出当系统受到负荷扰动和参数扰动时,基于PI的二次控制瞬态响应更慢,超调更大。

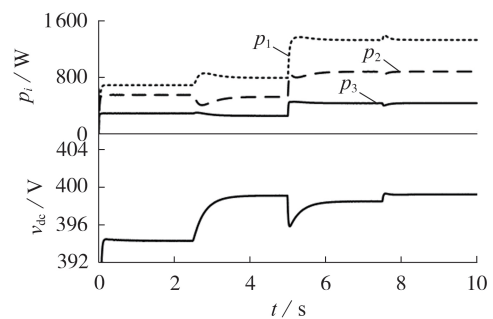


图8 PI控制下的系统动态响应

Fig.8 Dynamic response of system under PI control

4.3 算例3:考虑通信延迟的影响

本算例验证了无模型二次控制对通信延迟的鲁棒性。二次控制采样时间间隔为 $\Delta T=10$ ms,设置延迟时间为 $\{(d-1)\Delta T | d=1, 2, 3, 5, 10, 20\}$ 。所提无模型二次控制在 $t=2$ s时投入系统,在 $t=5$ s时投入负荷 $R_{\text{load-}2}$ 。系统在不同延迟时间下的动态响应见附录B图B2。可以看出,无模型二次控制能够实现不同延迟时间下系统的稳定,但是系统恢复至稳态所需要

的时间会增加,当延迟时间过长时系统会出现振荡。

4.4 算例4:考虑通信噪声的影响

当直流微电网孤岛运行时,二次控制需要在DG之间进行数据的传输,通信链路中的噪声干扰可能会降低控制器的动态性能。为了研究通信噪声对系统的影响,本算例在通信链路中增加了信噪比SNR(Signal to Noise Ratio)为40、30、20 dB的高斯白噪声。SNR越小表示噪声越大,文献[20]指出微电网中的SNR通常在30~40 dB之间。考虑通信噪声时的系统动态响应如图9所示。可以看出,在通信噪声的干扰下本文所提无模型二次控制可以实现控制目标并保证系统的稳定性,但是当噪声增大时,系统输出会产生一定的纹波。

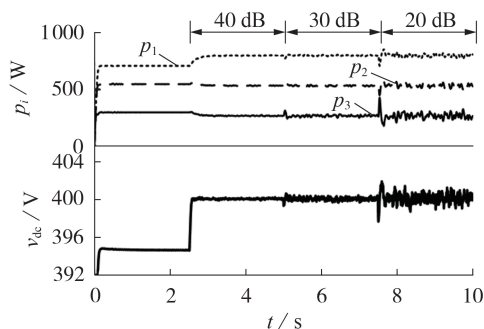


图9 考虑通信噪声时的系统动态响应

Fig.9 Dynamic response of system considering communication noise

4.5 算例5:考虑冲击负荷的影响

冲击负荷会影响系统的稳定性,本算例验证所提无模型二次控制对于冲击负荷的鲁棒性。冲击负荷在5、10、15 s时出现,持续时间为1 s。图10展示了当冲击负荷出现时系统的动态响应。可以看出,冲击负荷被成比例地分配给各DG,并且母线电压没有出现较大波动。

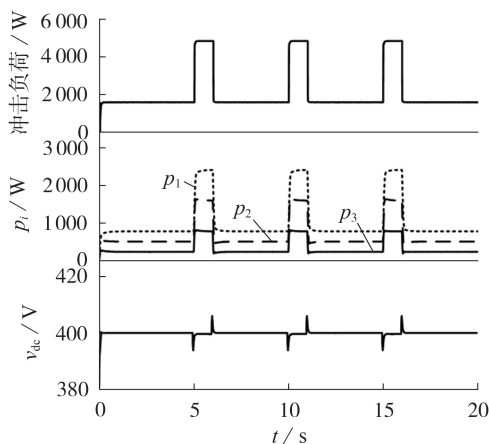


图10 考虑冲击负荷的系统动态响应

Fig.10 Dynamic response of system considering impact load

4.6 算例6:RTDS实验平台验证

本算例使用RTDS实验平台验证所提无模型二次控制的实用性。考虑随机负荷扰动的系统动态响应如图11所示。随机负荷投切顺序如下:0 s时,投入负荷 R_{load-1} ;5 s时,投入负荷 R_{load-2} ;10 s时, R_{load-2} 退出系统;15 s时,投入负荷 R_{load-3} ;20 s时, R_{load-3} 退出系统。由图11可以看出,DG按其容量成比例地输出功率,且母线电压可以稳定在参考值。无模型二次控制器的输出见附录B图B3。

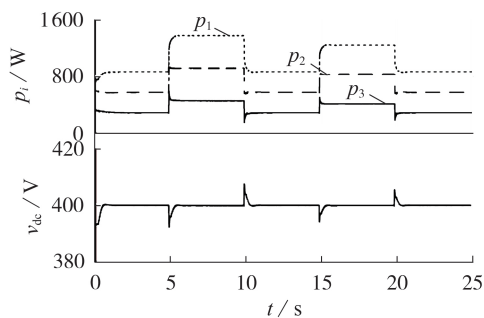


图11 考虑随机负荷的系统动态响应

Fig.11 Dynamic response of system considering random load

5 结论

本文提出了一种数据驱动的直流微电网无模型二次控制,用以提高孤岛直流微电网负荷功率分配精度和恢复母线电压。利用系统的输入输出数据在线设计二次控制,具有一次控制的直流微电网系统被视为“黑匣子”。基于MATLAB/Simulink仿真和RTDS实验平台得到的结果表明,所提控制策略可以保证直流微电网系统的BIBO稳定并且实现系统的精确控制,同时对于直流微电网系统的不确定性、未知扰动和时间延时等问题有较强的鲁棒性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 张忠,王建学,刘世民. 计及网络拓扑下微电网有功调节对电压控制的适应性分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):22-29.
ZHANG Zhong, WANG Jianxue, LIU Shimin. Adaptability of active-power adjustment to voltage control considering network topology of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 22-29.
- [3] 杨健,唐飞,廖清芬,等. 考虑可再生能源随机性的微电网经济性稳定性协调优化策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):179-184,200.
YANG Jian, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Microgrid economy and stability coordinated optimization considering randomness

- of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 179-184, 200.
- [4] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrid: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [5] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84, 344.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [6] 孟明, 陈世超, 卢玉舟, 等. 基于功率分层的直流微电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 30-37.
MENG Ming, CHEN Shichao, LU Yuzhou, et al. Coordinated control based on power hierarchy for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 30-37.
- [7] BIDRAM A, DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [8] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3462-3470.
- [9] LI Xialin, GUO Li, ZHANG Shaohui, et al. Observer-based DC voltage droop and current feed-forward control of a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5207-5217.
- [10] 吴济东, 汪可友, 黄鑫, 等. 孤立直流微电网多DC-DC变换器分布式协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 76-83.
WU Jidong, WANG Keyou, HUANG Xin, et al. Distributed coordinated control scheme of parallel DC-DC converters in isolated DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 76-83.
- [11] ZHANG H, ZHOU J, SUN Q, et al. Data-driven control for interlinked AC/DC microgrids via model-free adaptive control and dual-droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 557-571.
- [12] MA Zixiao, WANG Zhaoyu, GUO Yifei, et al. Nonlinear multiple models adaptive secondary voltage control of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 227-238.
- [13] KHOUBAN M, GHEISAMEJAD M, VAFAMAND N, et al. Robust frequency regulation in mobile microgrids: HIL implementation[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(4): 4281-4291.
- [14] HOANG K D, LEE H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1883-1893.
- [15] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.
LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806.
- [16] 米阳, 陈鑫, 季亮, 等. 基于虚拟额定电流的直流微电网分布式储能单元精确电流分配研究[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 823-835.
MI Yang, CHEN Xin, JI Liang, et al. Accurate current sharing of distributed energy storage units in DC microgrid based on virtual rated current[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 823-835.
- [17] DAM D, LEE H. A power distributed control method for proportional load power sharing and bus voltage restoration in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3616-3625.
- [18] HOU Zhongsheng, JIN Shangtai. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6): 1549-1558.
- [19] ZHAO C, SUN W, WANG J, et al. Distributed cooperative secondary control for islanded microgrid with Markov time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2235-2247.
- [20] YU J J Q, HOU Y, LAM A Y S, et al. Intelligent fault detection scheme for microgrids with wavelet-based deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1694-1703.

作者简介:



米 阳

米 阳(1976—),女,河南南阳人,教授,博士,主要研究方向为微电网控制、电力系统稳定与控制等(E-mail: miyangmi@163.com);

常俊飞(1996—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为直流微电网智能控制(E-mail: 1129344056@qq.com)。

(编辑 李玮)

Data-driven based secondary control for islanded DC microgrid

MI Yang, CHANG Junfei, SHI Shuai, CAI Pengcheng, FU Qixin, WANG Yufei, LIU Ronghui, JIANG Enyu
(College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: As for the islanded DC microgrid, a data-driven model-free secondary control strategy is proposed. The data model of system is established using the input and output process data of DC microgrid system and the partial format dynamic linearization method. Through designing the novel model-free secondary power and voltage controller, the proportional power allocation of distributed generation by its capacity can be achieved and the maximum voltage compensation method is used to restore the bus voltage of system. Through mathematical analysis, it is strictly proved that the DC microgrid system is stable in closed-loop control under different operation conditions. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by MATLAB/Simulink simulation and RTDS experiment platform.

Key words: DC microgrid; voltage recovery; power allocation; data-driven; model-free adaptive control

附录

附录 A

数据驱动无模型二次控制算法实现流程

- 1: 测量当前时刻微电网系统输出功率向量 $\mathbf{p}(k)$ 和电压向量 $\mathbf{v}_o(k)$ 并传输至二次控制器
 - 2: 二次控制通过数据与式(10)计算 PPD $\hat{\phi}_L(k)$
 - 3: if $\|\hat{\phi}_L(k)\| \leq \varepsilon$ 或 $\|\Delta \mathbf{U}_L(k-1)\| \leq \varepsilon$ 或 $|\text{sign}(\hat{\phi}_L(k)) - \text{sign}(\hat{\phi}_L(1))|$
 - 4: $\hat{\phi}_L(k) = \hat{\phi}_L(1)$
 - 5: else
 - 6: 基于 PPD 估算值得到 PFDL 模型(式(5))
 - 7: end
 - 8: 结合模型(式(5)), 利用式(12)计算 $\mathbf{u}_j(k)$
 - 9: 根据式(13)得到数据驱动无模型二次控制输出 $\mathbf{E}^* = [E_1^*, E_2^*, \dots, E_n^*]$ 和 $\mathbf{F}^* = [F^*, F^*, \dots, F^*]$
 - 10: 令 $k=k+1$ 并返回至步骤 1
-

附录 B

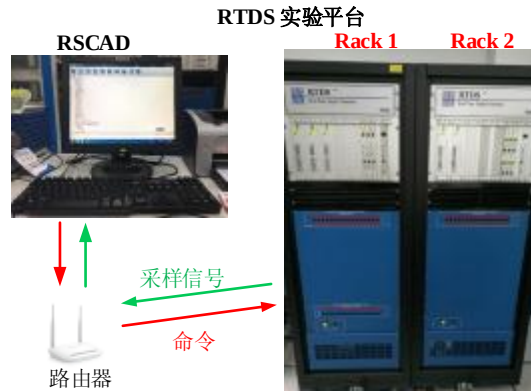


图 B1 RTDS 实验平台
Fig.B1 RTDS experiment platform

表 B1 直流微电网系统参数
Table B1 System parameters of DC microgrid

参数	取值
额定母线电压(V_{ref})	400V
最大允许电压偏差	$\pm 5\%(20V)$
DG ₁ 额定功率(p_{rate-1})	1kW
DG ₂ 额定功率(p_{rate-2})	2kW
DG ₃ 额定功率(p_{rate-3})	3kW
DG ₁ 线路电阻 R_{Line-1}	0.3Ω
DG ₁ 线路电感 L_{line-1}	1mH
DG ₂ 线路电阻 R_{Line-2}	0.5Ω
DG ₂ 线路电感 L_{line-2}	2mH
DG ₃ 线路电阻 R_{Line-3}	0.8Ω
DG ₃ 线路电感 L_{line-3}	3mH
R_{load-1}	100 Ω
R_{load-2}	150 Ω
R_{load-3}	200 Ω
电流环 PI 增益	50, 100
电压环 PI 增益	1, 50

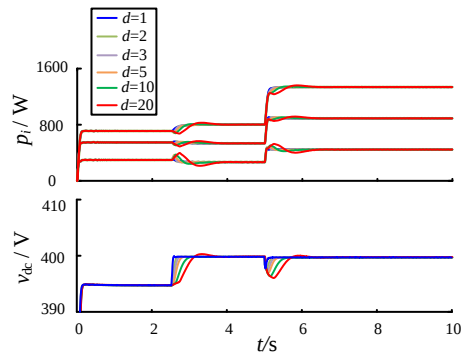


图 B2 考虑通信延迟的系统动态响应
Fig.B2 Dynamic response considering communication delay

图 B2 中蓝色曲线为没有延迟的情况，红色曲线为延迟最严重的情况。

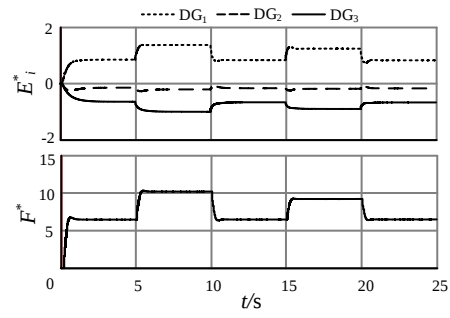


图 B3 无模型二次控制器输出

Fig.B3 Output of model-free secondary controller