

基于模拟状态信息的虚拟操作场景重构及微电网自适应控制设计

姚红伟¹, 张建琪¹, 温 镇¹, 王 法¹, 蒋晓波¹, 陈望达², 钱启宇²

(1. 国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000;

2. 国网浙江省电力有限公司海宁市供电公司, 浙江 嘉兴 314400)

摘 要: 母线电压对直流微电网系统的安全稳定运行至关重要。双向直流变换器调压过程呈现不确定、非线性和强耦合等特性, 同时, 传感器故障导致系统可控性显著下降。这些复杂因素极大降低了系统动态变化下的母线电压稳定性。针对以上问题, 首先借助状态反馈线性化技术构建虚拟操作场景, 并设计估计器模拟状态信息对虚拟场景进行系统性重构。其次利用重构状态信息, 将自适应控制方法和反步法相结合, 得到自适应非线性控制方案, 有效保证系统在外界复杂因素和内部故障出现时安全稳定运行。最后, MATLAB/Simulink 仿真结果验证了所提方案的有效性。

关键词: 直流变换器; 母线电压; 微电网; 模拟状态信息; 虚拟场景重构; 自适应控制

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)10-0077-09

doi: 10.12177/emca.2022.104

Virtual Operation Scenario Reconstruction and Microgrid Adaptive Control Design Based on Simulated State Information

YAO Hongwei¹, ZHANG Jianqi¹, WEN Zhen¹, WANG Fa¹, JIANG Xiaobo¹,
CHEN Wangda², QIAN Qiyu²

(1. Jiaxing Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314000, China;

2. Haining Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaxing 314400, China)

Abstract: The bus voltage plays a key role in the safe and stable operation of the DC microgrid system. The voltage regulation process of the bidirectional DC converter presents the characteristics of uncertainty, nonlinearity and strong coupling. Meanwhile, the controllability of the system is significantly decreased due to sensor failure. These complicated factors greatly reduce the stability of the bus voltage under the dynamical changes of the system. To solve these problems, firstly, the virtual operation scenario is constructed with the help of the state feedback linearization technique, and an estimator is designed to simulate the state information to reconstruct the virtual scenario systematically. Secondly, by using the reconstructed state information, the adaptive control method and the backstepping method are combined to obtain an adaptive nonlinear control scheme, which effectively ensures the safe and stable operation of the system in case of the complicated external factors and internal fails. Finally, the MATLAB/Simulink simulation results verify the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: DC converter; bus voltage; microgrid; simulated state information; virtual scenario reconstruction; adaptive control

收稿日期: 2022-07-28; 收到修改稿日期: 2022-08-23

作者简介: 姚红伟(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网建设及检测。

0 引言

随着煤炭、石油等传统化石能源日益枯竭,以太阳能、风能等可再生能源建立的微电网作为一种新模式,逐渐受到人们的重视。微电网将分布式可再生能源、分布式储能装置、相关负荷以及控制系统等集成一个独立电力单元,可实现电能就近使用,缓解能源枯竭问题^[1-2]。常见微电网可分为基于直流母线的直流微电网和基于交流母线的交流微电网^[3]。直流微电网中,可再生能源不需要多级转换即可并入直流母线^[4]。同时,电机等负载多是变频供电,直流可减少不必要的 AC-DC 整流环节^[5]。由于较大的技术优势,直流微电网已成为当前的研究热点。

直流微电网中,各分布式电源通过以变换器为代表的电力电子设备接入公共母线,这使得微电网各方面效能得到极大提升^[6-7]。为抑制储能双向直流变换器连接在母线所引起的并联环流现象,文献[8]发现引起并联环流的重要原因为 LC 谐振结构,并利用直流母线端口电容提出一种抑制方法。为有效保证光伏储能系统直流母线电压稳定运行,文献[9]通过改进型线性自抗扰控制技术,设计出双向直流变换器调节方案。但是,变换器通常包含复杂的非线性行为,并且调压过程中的工况环境变化不可避免地引起未知干扰因素,这极大增加了系统控制难度^[10-12]。上述经典线性控制器方法存在较大的局限性,不能满足系统稳定运行控制要求^[13-14]。针对电力变换器带恒功率负载这一非线性工况,文献[15]采用精确线性化对系统反馈控制,进而获得了稳定条件。文献[16]利用母线电容能量及电感电流提出双闭环控制策略,扩大了系统稳定区域。文献[17]进一步分析储能单元作为调压电源时的微电网工作状态,利用鲁棒反步滑模技术,解决了非线性结构中出现的外界干扰问题。针对储能装置中呈现的非线性与时变参数问题,文献[18]借助蓄电池作为功率平衡装置,利用参数反步方法设计了充放电控制器,解决了孤岛型微电网直流母线电压波动问题。此外,针对双向变换器直流母线电压控制系统,文献[19]设计了非线性干扰观测器,并提出观测器输出前馈策略,抑制暂态直流母线电压的波动。但是变换器调压工况往往非常复杂,不确定参

数和非线性动态相互耦合不可避免,且难以处理。此时,上述的经典控制方法不再适用。

文献[15-19]中提出的控制策略需要利用传感器采集电压电流信息。在微电网动态运行过程中,如果传感器出现故障,系统将面临开环运行状况,严重破坏系统性能^[20-21]。加入更多传感器件可以解决传感器故障问题,但会增加成本,限制了其工程应用。针对这一问题,文献[22]建立基于自适应观测器的预测方法,实现电机电流模型预测控制。文献[23]设计直流母线电流重构法,利用电流采样信息和逆变器开关管状态来重构相电流。文献[24]提出一种基于控制模型和电感模型的电流重构方法,并应用有源阻尼技术优化重构电流。文献[25]将模糊自适应方法与约束处理策略相结合,实现了对电机转子磁链的准确观测估计。上述文献处理方法大多直接利用观测电流信息代替真实电流信息,构成闭环控制。然而,系统模型通常比较复杂,需经过坐标变换预处理得到一个易于控制的虚拟运行系统。若虚拟系统的状态信息不可测得,尤其是在不确定参数和非线性扰动耦合出现时,即使直接估计出真实电流也不能用于虚拟变换系统的控制设计,上述控制方法并不能有效应对此类故障影响。

本文分析直流微电网双向直流变换器调压过程,借助状态反馈线性化技术构建虚拟操作场景,由于传感器故障导致虚拟系统状态不可测,设计状态观测器代替不可测状态用于闭环控制。同时,考虑不确定参数和非线性扰动耦合情形,将自适应控制方法和反步法结合,构造自适应律补偿不确定性对母线电压造成的不稳定影响,得到自适应控制方案。最后,通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了该控制策略的有效性。

1 系统状态空间模型

典型直流微电网结构如图 1 所示。光伏、风机等分布式电源(RES)一般通过 DC-DC 或 DC-AC 变换器接入直流母线。为实现可再生能源最大化利用,常采用最大功率跟踪设计方案。微电网中直流负荷可直接接入直流母线,也可通过 DC-DC 变换器接入,交流负荷接入直流母线一般通过 DC-AC 变换器接入,考虑电阻,本文将直流负荷直接接入母线。微电网通过双向 DC-AC 变

换器与大系统相连,当大系统运行正常时,变换器采用 PQ 控制模式维持恒功率控制,当交流电网由于故障或能源质量问题等不满足要求时,变换器可随之切换到独立运行状态,为当地交流负荷小范围就近供电^[26-27]。本文考虑储能单元(ESS)作为主电源,当微电网中能量不足导致母线电压降低时,ESS 释放能量,反之 ESS 吸收能量,以此维持微电网中直流母线电压恒定,保证安全稳定控制并提高电能质量。

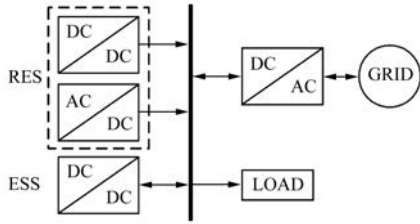


图1 直流微电网结构图

在图1所示的直流微电网中,由 ESS 及其 DC-DC 双向变换器控制直流母线电压,其简化结构如图2所示^[17,19]。图中, C 、 L 、 R 分别为变换器高压侧电容、变换器电感及母线阻性负荷; P_{CPL} 为等效恒功率负荷,包括分布式电源输出、双向 DC-AC 变换器输出功率、恒功率控制方式下的交、直流负荷之和; i_L 、 u_{dc} 、 u_s 分别为储能电感电流、直流母线电压及储能电池端口电压。

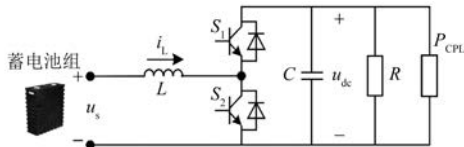


图2 直流微电网简化结构图

图2中,双向变换器控制方法为 S_1 接入 S_2 断开, S_2 接入 S_1 断开,两个开关同时切换状态。与两个开关各自为控相比,互补同步控制无需增加逻辑单元对 Buck/Boost 电路进行过渡切换,减少成本的同时提高了工作效率。图2所示系统的状态空间平均模型为^[19]

$$\begin{cases} C \frac{du_{dc}}{dt} = i_L - \frac{u_{dc}}{R} - i_L d - \frac{P_{CPL}}{u_{dc}}, u_{dc} > \varepsilon \\ L \frac{di_L}{dt} = -u_{dc} + u_s + u_{dc} d \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon > 0$, 表示一个较小常数; d 表示 S_2 的占

空比。

选择系统状态变量 $z_1 = u_{dc}$, $z_2 = i_L$, 同时记 $\mathbf{Z} = [z_1, z_2]^T$, 式(1)可改写为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Z}} = f_1(\mathbf{Z}) + f_2(\mathbf{Z})d \\ y = g(\mathbf{Z}) = z_1 - z_{ref} \end{cases} \quad (2)$$

式中: y 为系统的输出变量; 占空比 d 为控制变量; z_{ref} 为输出参考值; 同时函数 $f_1(\mathbf{Z})$ $f_2(\mathbf{Z})$ 定义如下:

$$\begin{cases} f_1(\mathbf{Z}) = \left[\frac{1}{C} \left(z_2 - \frac{z_1}{R} - \frac{P_{CPL}}{z_1} \right), \frac{1}{L} (u_s - z_1) \right]^T \\ f_2(\mathbf{Z}) = \left[-\frac{z_2}{C}, \frac{z_1}{L} \right]^T \end{cases} \quad (3)$$

下文中,系统(1)是指所研究直流微电网的状态空间平均模型,系统(2)是指选择状态变量后的等价表达形式。

2 虚拟操作场景变换

系统(2)是实际操作场景的状态空间表示,是一个仿射非线性系统,其中 $f_1(\mathbf{Z})$ 具有复杂的非线性特性,传统控制方法很难处理此类复杂的非线性系统。近年来,微分几何理论不断发展,为解决非线性系统控制问题提供了一种有效的工具,形成了非线性系统控制的几何理论框架,并广泛应用于工程技术中^[15-17]。针对系统(2),利用微分几何中反馈线性化理论将实际操作系统转化为一个等价变换模型。由于转化后的等价系统并不真实运行,称为虚拟操作场景。文献[15]提出了将仿射非线性系统转化为线性系统的充分条件,即(1) 矩阵 $[f_2(\mathbf{Z}), ad_{f_1}f_2(\mathbf{Z})]$ 在条件 $z_1 > \varepsilon$ 成立时,其秩等于系统的维数;(2) 向量场 $f_2(\mathbf{Z})$ 满足对合条件。

下面针对式(2)所示的状态空间模型进行线性化条件检验。首先,计算向量场 $f_2(\mathbf{Z})$ 对向量场 $f_1(\mathbf{Z})$ 的李括号可以得到:

$$ad_{f_1}f_2(\mathbf{Z}) = \frac{\partial f_2(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} f_1(\mathbf{Z}) - \frac{\partial f_1(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} f_2(\mathbf{Z}) = \begin{bmatrix} \frac{P_{CPL}z_2}{C^2z_1^2} - \frac{u_s}{CL} - \frac{z_2}{C^2R} \\ -\frac{P_{CPL}}{CLz_1} - \frac{z_1}{CLR} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由此可知,矩阵 $[f_2(\mathbf{Z}), \text{ad}_{f_1} f_2(\mathbf{Z})]$ 在条件 $z_1 > \varepsilon$ 成立时,其秩为2,等于系统的维数。另外,由于系统(2)的维数等于2,向量场 $f_2(\mathbf{Z})$ 满足对合条件。因此,根据文献[15]的充分条件,系统(2)可以转化为一个可控线性系统。

系统(2)的输出无法实现系统的精确线性化。为了完成精确线性化,此处构造一个新的输出函数 $y = \varphi(\mathbf{Z})$,使系统对输出的关系度等于系统维数2。为此只需要输出满足偏微分方程 $L_{f_2} \varphi(\mathbf{Z}) = 0$, 并且 $L_{f_2} L_{f_1} \varphi(\mathbf{Z}) \neq 0$ 。将 $f_2(\mathbf{Z})$ 代入 $L_{f_2} \varphi(\mathbf{Z}) = 0$, 求解得到:

$$y = \varphi(\mathbf{Z}) = \frac{1}{2} C z_1^2 + \frac{1}{2} L z_2^2 \quad (5)$$

由构造输出 $\varphi(\mathbf{Z})$, 根据反馈线性化求解需要的坐标变换,经计算可得:

$$\begin{cases} L_{f_1} \varphi(\mathbf{Z}) = \frac{\partial \varphi(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} f_1(\mathbf{Z}) = -\frac{z_1^2}{R} - P_L + z_2 u_s \\ L_{f_2} L_{f_1} \varphi(\mathbf{Z}) = \frac{\partial L_{f_1} \varphi(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} f_2(\mathbf{Z}) = \frac{2z_1 z_2}{CR} + \frac{u_s z_1}{L} \\ L_{f_1}^2 \varphi(\mathbf{Z}) = \frac{\partial L_{f_1} \varphi(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} f_1(\mathbf{Z}) = \\ -\frac{2z_1 z_2}{CR} + \frac{2z_1^2}{CR^2} + \frac{2P_L}{CR} - \frac{u_s z_1}{L} + \frac{u_s^2}{L} \end{cases} \quad (6)$$

选择坐标变换:

$$\begin{cases} x_1 = \varphi(\mathbf{Z}) = \frac{1}{2} C z_1^2 + \frac{1}{2} L z_2^2 \\ x_2 = L_{f_1} \varphi(\mathbf{Z}) = -\frac{z_1^2}{R} - P_L + z_2 u_s \end{cases} \quad (7)$$

计算可知系统(2)变为如下标准型:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = v \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$v = L_{f_2} L_{f_1} \varphi(\mathbf{Z}) d + L_{f_1}^2 \varphi(\mathbf{Z}) \quad (9)$$

选择坐标变换式(7),通过计算得到标准输出反馈模型式(8),以及新的输出变量 $y = \frac{1}{2} C z_1^2 + \frac{1}{2} L z_2^2 = x_1$ 。电路系统的状态空间平均模型中非线性函数是直流微电网内部结构。变换器调压工况往往非常复杂,不可避免地出现未知外部干扰和

非线性动态等复杂因素,而且这些不确定因素之间往往相互耦合。因此,考虑不确定、非线性及其之间的耦合因素,得到如下不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = h(y) \theta + v \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $h(y)$ 为未知 Lipschitz 非线性函数且满足 $h(0)=0$; θ 为未知有界参数。

3 虚拟状态信息模拟观测

微电网的正常运行是一个不断动态反馈调整过程,如果传感器出现故障,系统将面临开环运行状况,无法实现闭环控制^[21]。目前处理方法多是直接观测真实系统运行信息用于反馈闭环控制。然而,真实运行模型系统(1)存在较复杂非线性项,经过坐标变换预处理,本文得到一个易于控制的虚拟运行系统(10),如式(10)所示。此时状态变量是虚拟整合量,在不确定参数和非线性扰动耦合出现时,即使直接估计出真实电流也不能用于虚拟变换系统的控制设计。因此,针对虚拟系统(10)而非原始系统,设计如下状态模拟观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + k_1(y - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = v + k_2(y - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (11)$$

式中:选择 k_1, k_2 使多项式 $f(s) = s^2 + k_1 s + k_2$ 是一个 Hurwitz 多项式。

定义向量 $\mathbf{K} = (k_1, k_2)^T$ 、向量 $\mathbf{E} = (1, 0)^T$, 以及矩阵: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

定义变量 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$, 计算可得:

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{KE}^T) \mathbf{e} + \mathbf{F} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{F} = [0, h(y)\theta]$ 。

因为 $f(s)$ 是 Hurwitz 多项式,对于任意常数 $q > 0$,都存在一个正定矩阵 $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$, 使得下式成立:

$$(\mathbf{A} - \mathbf{KE}^T)^T \mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{KE}^T) = -q\mathbf{I} \quad (13)$$

选择 Lyapunov 候选函数

$$\mathbf{V} = \mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (14)$$

其导数可通过式(11)、式(12)和式(13)计算得:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{e}^T [(\mathbf{A} - \mathbf{KE}^T)^T \mathbf{P} + \mathbf{P}(\mathbf{A} - \mathbf{KE}^T)] \mathbf{e} + 2\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{F} \\ &\leq -q \|\mathbf{e}\|^2 + 2 \|\mathbf{e}\| \|\mathbf{P}\| |h(y)\theta| \end{aligned} \quad (15)$$

以下对式(15)中最后一项进行估计。因为 $f(y)$ 满足 Lipschitz 条件且满足 $f(0)=0$, 故存在常数 a_1 使:

$$\begin{aligned} h(y) &= h(x_1) - h(\hat{x}_1) + h(\hat{x}_1) \\ &\leq a_1 |e_1| + a_1 |\hat{x}_1| \end{aligned} \quad (16)$$

令 $\vartheta = \theta^2$, 利用式(16)及配方法计算得到:

$$\begin{aligned} 2 \|e\| \|P\| |h(y)\theta| &= \\ 2 \|P\| |e| a_1 (|e_1| + |\hat{x}_1|) |\theta| &= \\ \leq (2\bar{\theta} + 1) a_1 \|P\| \|e\|^2 + a_1 \|P\| \hat{x}_1^2 \vartheta \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\bar{\theta}$ 为 θ 的上界。

将式(17)代入式(15)可得:

$$\dot{V} \leq -(q - q_0) \|e\|^2 + a_1 \|P\| \hat{x}_1^2 \vartheta \quad (18)$$

式中: $q_0 = (2\bar{\theta} + 1) a_1 \|P\|$ 。

4 自适应设计及稳定性分析

针对虚拟系统(10)进行自适应反馈设计, 利用反步法控制思想, 进行逐步迭代, 最终得到基于式(11)中模拟状态信息的自适应控制方案。为此, 构造如下新的虚拟变量:

$$\begin{cases} \eta_1 = \hat{x}_1 \\ \eta_2 = \hat{x}_2 - \hat{x}_2^* \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\hat{x}_2^*$ 为 $\hat{x}_2$ 看作虚拟控制变量所设计的虚拟控制器, 其设计过程将迭代给出。

进行第一步迭代设计。构造 Lyapunov 候选函数:

$$W_1 = V + \frac{1}{2} \eta_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{\vartheta}^2 \quad (20)$$

式中: $\tilde{\vartheta} = \vartheta - \hat{\vartheta}$, $\hat{\vartheta}$ 为 ϑ 的估计值。

由式(11)及式(19), 计算得:

$$\dot{\eta}_1 = \hat{x}_2 + k_1(y - \hat{x}_1) \quad (21)$$

由式(18)、式(20)及式(21), 对 W_1 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{W}_1 = \dot{V} + \eta_1 \dot{\eta}_1 - \tilde{\vartheta} \dot{\hat{\vartheta}} &\leq -(q - q_0) \|e\|^2 - \tilde{\vartheta} \dot{\hat{\vartheta}} + \\ \eta_1 [\hat{x}_2 + k_1(y - \hat{x}_1) + a_1 \|P\| \hat{x}_1 \vartheta] \end{aligned} \quad (22)$$

将 $\hat{x}_2$ 看作虚拟控制变量, 设计如下虚拟控制器 $\hat{x}_2^*$ 及自适应律 $\hat{\vartheta}$

$$\begin{cases} \hat{x}_2^* = -l_1 \hat{x}_1 - k_1(y - \hat{x}_1) - a_1 \|P\| \hat{x}_1 \hat{\vartheta} \\ \dot{\hat{\vartheta}} = -l_0 \hat{\vartheta} + a_1 \|P\| \hat{x}_1^2 \end{cases} \quad (23)$$

式中: l_0 及 l_1 为待设计正常数。

将式(23)代入式(22), 经过计算得到:

$$\dot{W}_1 \leq -(q - q_0) \|e\|^2 - l_1 \eta_1^2 + \eta_1 \eta_2 + l_0 \tilde{\vartheta} \hat{\vartheta} \quad (24)$$

进行第二步迭代设计, 并构造最终的 Lyapunov 函数:

$$W_2 = W_1 + \frac{1}{2} \eta_2^2 \quad (25)$$

由式(11)及式(19)计算可知:

$$\dot{\eta}_2 = v + k_2(y - \hat{x}_1) - \dot{\hat{x}}_2^* \quad (26)$$

由式(24)及式(26), 对 W_2 求导算得:

$$\begin{aligned} \dot{W}_2 &\leq -(q - q_0) \|e\|^2 - l_1 \eta_1^2 + \eta_1 \eta_2 + l_0 \tilde{\vartheta} \hat{\vartheta} + \\ \eta_2 [v + k_2(y - \hat{x}_1) - \dot{\hat{x}}_2^*] \end{aligned} \quad (27)$$

利用式(11)、式(19)及式(23), 通过计算得到:

$$\dot{\hat{x}}_2^* = \beta(\hat{\vartheta}, \hat{x}_2, \hat{x}_1, y) - k_1 e_2 \quad (28)$$

其中

$$\begin{aligned} \beta(\hat{\vartheta}, \hat{x}_2, \hat{x}_1, y) &= \\ -l_1 [\hat{x}_2 + k_1(y - \hat{x}_1)] + k_1^2(y - \hat{x}_1) - \\ a_1 \|P\| [\hat{x}_2 + k_1(y - \hat{x}_1)] \hat{\vartheta} - \\ a_1 \|P\| \hat{x}_1 (-l_0 \hat{\vartheta} + a_1 \|P\| \hat{x}_1^2) \end{aligned} \quad (29)$$

利用配方不等式, 对式(27)中出现的不确定项进行估计, 通过直接计算可知:

$$\begin{aligned} k_1 \eta_2 e_2 &\leq \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} k_1^2 \eta_2^2 \tilde{\vartheta} \hat{\vartheta} = \\ \tilde{\vartheta} (\vartheta - \tilde{\vartheta}) &\leq -\frac{1}{2} \tilde{\vartheta}^2 + \frac{1}{2} \vartheta^2 \end{aligned} \quad (30)$$

设计如下自适应控制器

$$\begin{aligned} v &= -l_2 \eta_2 - \frac{1}{2} k_1^2 \eta_2^2 - k_2(y - \hat{x}_1) + \\ \beta(\hat{\vartheta}, \hat{x}_2, \hat{x}_1, y) \end{aligned} \quad (31)$$

将式(28)、式(30)及式(31)代入式(27)计算得到:

$$\begin{aligned} \dot{W}_2 &\leq -\left(q - q_0 - \frac{1}{2}\right) \|e\|^2 - \\ l_1 \eta_1^2 - l_2 \eta_2^2 - \frac{l_0}{2} \tilde{\vartheta}^2 + \frac{l_0}{2} \vartheta^2 \end{aligned} \quad (32)$$

对于给定正常数 $q_1 > 0$, 选择 q 使 $q - q_0 - \frac{1}{2} > q_1$, 并且令 $l = \min q_1 \lambda_{\max}(P), l_0, l_1, l_2$, 则式(32)变为

$$\dot{W}_2 \leq -l W_2 + \frac{l_0}{2} \vartheta^2 \quad (33)$$

由式(33)积分可知:

$$W_2(t) \leq -e^{-l(t-t_0)} W_2(0) + \frac{l_0 \vartheta^2}{2l} [1 - e^{-l(t-t_0)}] \quad (34)$$

式中: t_0 为初始时间。

由式(25)可知 W_2 关于变量 $e, \eta_1, \eta_2, \tilde{\vartheta}$ 为正定函数, 因此由式(34)可知变量 $e, \eta_1, \eta_2, \tilde{\vartheta}$ 有界。进一步根据变量 e, η_1, η_2 的定义及 Lyapunov 稳定性理论, 得到闭环系统状态 $x_1, x_2, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \tilde{\vartheta}$ 在原点处适用、稳定, 并且状态 $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ 适用跟踪虚拟状态 x_1, x_2 。

在上述控制设计中, 设计参数选择 k_1, k_2 严格大于 0, 且使 $f(s) = s^2 + k_1 s + k_2$ 是一个 Hurwitz 多项式, 选择 l_0, l_1, l_2 为严格大于 0 的正常数。由式(33)和式(34)可知, 选择较大的参数 l_0, l_1, l_2 以及选择合适的 k_1, k_2 会使闭环系统具有较快的收敛速度, 但是会增加控制消耗。因此, 在实际参数选择中, 需要综合考虑系统性能和能量消耗。

反步法控制思想运用于针对虚拟系统(10)的自适应反馈设计过程, 其系统控制结构框图如图 3 所示。

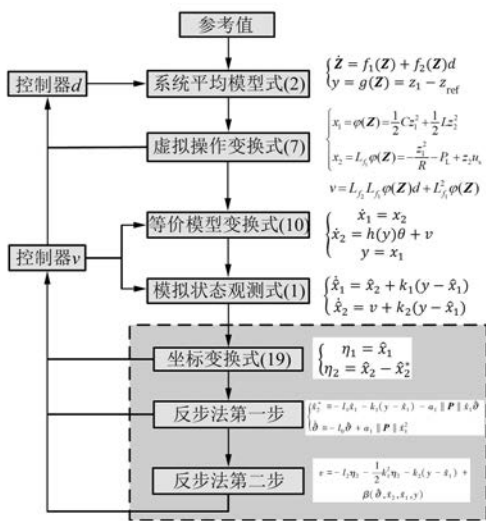


图 3 系统控制设计结构图

5 仿真结果分析

为了验证所提策略的有效性, 利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型, 选取相关系统参数^[15, 17, 19]: 蓄电池端电压 $u_s = 200$ V, 直流母线电压参考值 $u_{ref} = 200$ V, 变换器电感 $L = 15$ mH, 电容

$C = 1\ 000\ \mu\text{F}$, 开关频率为 10 kHz。选取控制设计参数: $k_1 = 3, k_2 = 5, l_1 = 50, l_2 = 100, l_0 = 20, q = 5$ 。设定工况: 选取光伏为分布式电源, 仿真时间设定为 10 s, 初始等效恒功率负荷为 6 kW, 母线阻性负荷为 30 Ω 。当 $t = 1$ s 时, 母线阻性负荷不变, 等效恒功率负荷增加至 12 kW; 当 $t = 2.5$ s 时, 母线阻性负荷不变, 等效恒功率负荷减少至 8 kW; 当 $t = 4$ s 时, 等效恒功率负荷不变, 母线阻性负荷增加至 50 Ω 。当 $t = 6$ s 时, 减少等效恒功率负荷至 6 kW, 母线阻性负荷减少至 40 Ω ; 在 $t = 8$ s 时增加等效恒功率负荷至 12 kW, 同时减少母线阻性负荷至 30 Ω 。为了突出本文所提方法的优势, 仿真中将本文控制方法与滑模控制方法、干扰观测器控制方法进行比较。其中滑模控制结构参照文献[17], 并选择 3 组滑模控制参数进行对比, 第 1 组参数为 1、20、5; 第 2 组参数为 10、200、50; 第 3 组参数为 100、2 000、500。

仿真中, 本文方法自适应控制环节通过增加积分器扩维来实现。首先利用输入、输出信息构造虚拟状态观测器, 通过观测器状态变量驱动生成自适应参数。自适应控制的作用在于处理系统中的不确定参数, 消除不确定参数的影响。

当工况突变时, 图 4~图 8 分别给出本文自适应控制方法、3 组参数滑模控制方法、故障发生开环控制方法下的直流母线波动图。为更清晰地展现仿真结果, 将以上图形转化为表格和折线图形式。表 1 与折线图 9 展示不同方法之间的母线电压波动幅度, 表 2 与折线图 10 展示不同方法之间的母线电压收敛时间。

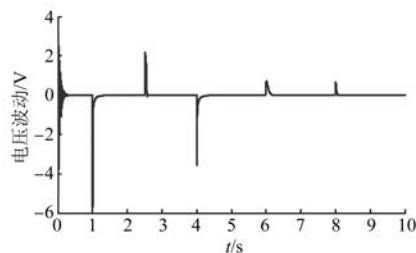


图 4 本文方法下工况突变时直流母线电压波动图

当 $t = 1$ s、 $t = 4$ s、 $t = 6$ s 以及 $t = 8$ s, 工况突变时, 由表 1 可知, 相比于干扰观测器方法与滑模控制方法, 本文方法下的直流母线电压波动均最小, 且具有明显优势。当 $t = 2.5$ s 时, 等效恒功率负荷减少至 8 kW, 本文方法下的直流母线电压波动 2.5

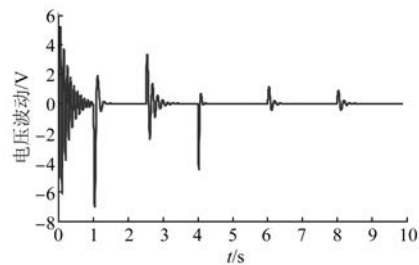


图5 干扰观测器控制方法下工况突变时直流母线电压波动图

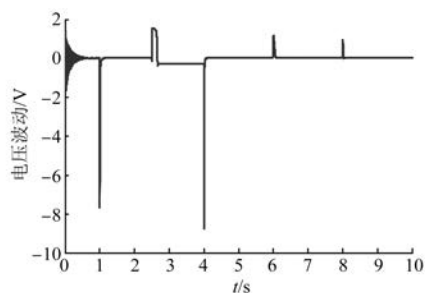


图6 滑模控制方法第1组参数下工况突变时直流母线电压波形

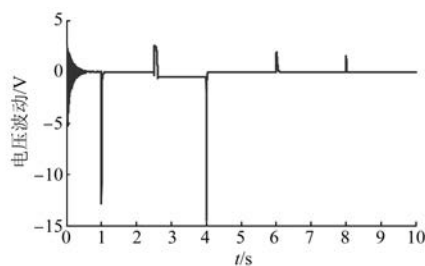


图7 滑模控制方法第2组参数下工况突变时直流母线电压波形

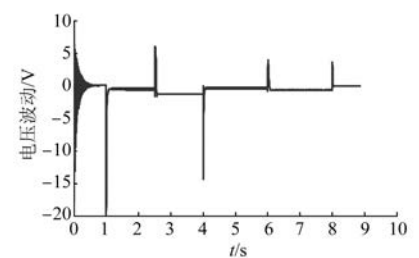


图8 滑模控制方法第3组参数下工况突变时直流母线电压波形

V,除第3组参数下母线电压波动明显外,其他方法电压波动相差不大,但图6~图8显示滑模控制方法下母线电压跟踪参考值存在1 V左右的偏差。

工况突变时,不同方法的收敛时间如表2及折线图10所示。由上述图、表可知,本文方法的收敛时间明显短于扰动观测器方法。虽然滑模控制方法在选择设计参数足够大时,收敛时间较短,但与本文方法相比并无明显优势。此外,由图6~图8可看出,滑模控制方法下有不同程度的稳态偏差,且滑模控制选择大增益时,会出现抖振现象。

表1 不同方法下母线电压波动幅值 V

时间/s	本文方法	干扰观测器	滑膜控制方法		
			参数1	参数2	参数3
0~1.0	3.8	5.2	1.3	2.1	5.5
1.0~2.5	5.9	6.9	7.6	13	20
2.5~4.0	2.5	3.3	2.4	2.5	5.9
4.0~6.0	4.0	4.5	8.7	14.5	14.6
6.0~8.0	0.7	1.2	1.2	1.8	3.8
8.0~10.0	0.6	0.9	0.9	1.5	3.5

表2 不同方法下母线电压收敛时间 s

时间/s	本文方法	干扰观测器	滑膜控制方法		
			参数1	参数2	参数3
0~1.0	0.29	>1	0.80	0.70	0.67
1.0~2.5	0.35	0.45	0.13	0.15	0.45
2.5~4.0	0.06	0.97	0.50	0.57	0.52
4.0~6.0	0.35	0.25	0.16	0.13	0.11
6.0~8.0	0.18	0.38	0.12	0.15	0.08
8.0~10.0	0.06	0.56	0.05	0.06	0.03

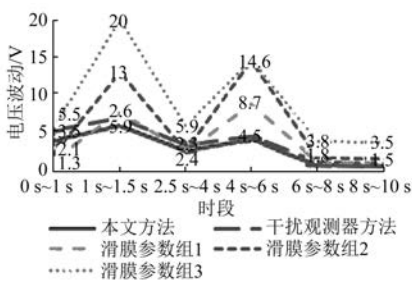


图9 不同方法下母线电压波动幅值

综上,本文方法的母线电压波动幅度明显小于扰动观测器方法与滑模控制方法,稳态偏差明显优于滑模控制方法,收敛时间明显少于扰动观测器方法。滑模控制在选择足够大控制增益时,收敛时间略少于本方法,但能量消耗巨大,稳态值与期望值存在明显偏差,且发生抖振现象。仿真

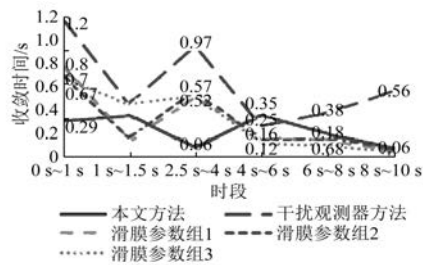


图 10 不同方法下母线电压波动收敛时间

结果表明采用本文方法的控制效果明显优于扰动观测器方法与滑模控制方法。

图 11 及图 12 表明在 $t=0.2\text{ s}$ 或 $t=1.5\text{ s}$ 发生故障时,若采用开环控制,直流母线电压将快速失控,稳定性无法保证。图 13、图 14 为采用本文方法的虚拟操作场景状态及其观测值,如图所示,观测状态逼近虚拟状态信息。图 15 为本文方法下的参数自适应律。

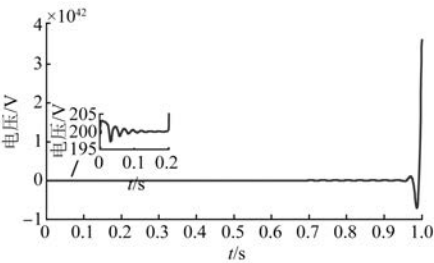


图 11 在 $t=0.2\text{ s}$ 发生故障时开环控制直流母线电压波形

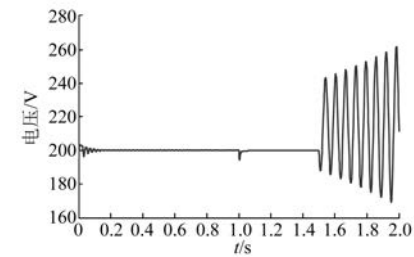


图 12 在 $t=1.5\text{ s}$ 发生故障时开环控制直流母线电压波形

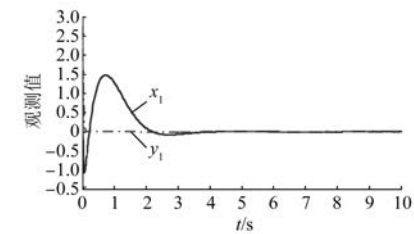


图 13 本文方法下虚拟操作场景系统状态 x_1 及观测值

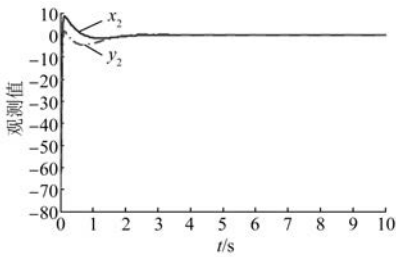


图 14 本文方法下虚拟操作场景系统状态 x_1 及观测值

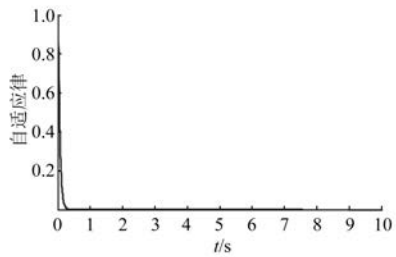


图 15 本文方法下自适应律

6 结 语

在双向直流变换器调压过程中,不确定扰动、非线性及其强耦合等复杂因素影响母线电压稳定。为了解决此问题,同时更好地应对由于传感器故障导致系统可控性降低情况下的稳定设计问题,本文以反馈线性化和反步思想为基础,结合虚拟状态观测技术提出一种自适应反馈控制策略,得出以下结论。

- (1) 在虚拟线性化系统状态不可测时,观测器较好地估计出虚拟状态信息,利用估计信息对虚拟场景进行系统性重构,并用于闭环反馈设计。
- (2) 基于反步自适应方法设计自适应律可以补偿不确定因素影响,使母线电压在不确定、非线性及复杂耦合因素工况下能够稳定运行。

【参考文献】

[1] 刘海媛,杨波,郭一楠,等. 应用于大规模新能源并网的 MMC-MTDC 双因子自适应下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(3): 793.

[2] 范广胜,朱琳,封洋燚,等. 交直流混合微电网并接口变换器的 VSG 控制策略[J]. 电机与控制应用,2021,48(3): 68.

[3] LOTFI H, KHODAEI A. AC versus DC microgrid planning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,

- 2017, 8(1): 296.
- [4] 刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 等. 光储微电网逆变器有限集模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 81.
- [5] WANG P, LU X, YANG X, et al. An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6658.
- [6] 杨鹏龙, 董海鹰. 基于改进型同步逆变器技术的微电网变换器[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 7.
- [7] 丁肇豪, 曹雨洁, 张素芳, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(一): 数据中心能耗模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3161.
- [8] 张翌, 谢少军, 尚晓凤, 等. 电流源双向直流变换器的并联环流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 181.
- [9] 周雪松, 谢冰杰, 马幼捷, 等. 基于改进自抗扰的双向 DC-DC 变换器控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(15): 10.
- [10] 张赞, 王琛, 王毅, 等. 基于自适应下垂控制的直流微电网多储能 SOC 动态均衡策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 21.
- [11] 周志勇, 闫振彬. DC-DC 升降压变换器协同控制器设计[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(4): 12.
- [12] 张玮麟, 张耀昌, 刘东立. 非对称半桥交错并联输出式 LLC 谐振 DC-DC 变换器设计[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 81.
- [13] 韩猛, 陈昭, 张玮麟. 新型电动汽车双向隔离型 DC-DC 变换器控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(7): 29.
- [14] 易灵芝, 王力雄, 李旺, 等. 开关磁阻电机功率变换器综述[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 1.
- [15] 高朝晖, 林辉, 张晓斌. Boost 变换器带恒功率负载状态反馈精确线性化与最优跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 70.
- [16] WANG J, HOWE D. A power shaping stabilizing control strategy for DC power systems with constant power loads [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 2982.
- [17] 王宝华, 蒋力. 基于精确反馈线性化的直流微电网双向直流变换器反步滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 43.
- [18] 申景潮, 胡健, 胡敬梁, 等. 直流微电网储能装置双向 DC-DC 变换器参数自适应反步控制[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1512.
- [19] 李霞林, 郭力, 冯一彬, 等. 基于非线性干扰观测器的直流微电网母线电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 350.
- [20] 林京京, 沈艳霞. 永磁同步电机驱动系统电流传感器容错控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(9): 1815.
- [21] 姚鹏. 人工智能技术在交流异步电机故障诊断中的应用[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(4): 1.
- [22] HU Z, YANG M, YANG K, et al. Current sensorless direct predictive control for permanent-magnet synchronous motor drives [C] // International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2016.
- [23] 申永鹏, 郑竹风, 杨小亮, 等. 直流母线电流采样电压空间矢量脉宽调制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1617.
- [24] 刘腾飞, 田艳军, 姜玉霞, 等. 基于有源阻尼电流观测器的并网逆变器无传感器反馈控制[J]. 中国电机工程学报, doi:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211607.
- [25] 刘乐, 高杰, 刘鹏, 等. 基于滑模观测器的交流异步电机预设性能位置跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3432.
- [26] ZHANG Z, DOU C, YUE D, et al. Predictive voltage hierarchical controller design for islanded microgrids under limited communication [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2022, 69(2): 933.
- [27] ZHANG Z, DOU C, YUE D, et al. Event-triggered hybrid voltage regulation with required BESS sizing in high-PV-penetration networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2614.