

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190660

基于 ESO-Backstepping 的直流微电网母线电压稳定控制

吴忠强, 王云青, 赵德隆, 刘重阳

(燕山大学工业计算机控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对微电网中存在的非线性和参数变化等问题, 为提高微电网直流母线电压控制的稳定性, 提出了一种 ESO 与 Backstepping 相结合的控制方案。采用 ESO 观测系统的非线性及参数变化, 采用 Backstepping 方法设计控制器, 在补偿系统非线性和参数变化的同时保证系统的稳定性。并将所提的 ESO-Backstepping 控制方法与经典 PID、Backstepping 控制方法进行对比。仿真结果表明 ESO-Backstepping 控制方法在微电网非线性系统参数发生变化的情况下, 仍可实现对直流母线电压的稳定控制, 方法简单有效、稳定性好、鲁棒性强。

关键词: 直流微电网; 直流母线电压控制; 扩张状态观测器; 反步法; 稳定性

Research on bus voltage stability control of DC microgrid based on ESO-Backstepping

WU Zhongqiang, WANG Yunqing, ZHAO Delong, LIU Chongyang

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the stability control of DC bus voltage in microgrid, a control scheme combining ESO and backstepping is proposed to solve the problems of nonlinearity and parameter variation in microgrid. ESO is adopted to observe the non-linearity and parameter variation of system. Backstepping method is used to design the controller, which can compensate the non-linearity and parameter variation of the system while ensuring the stability of the system. The ESO-Backstepping based control method proposed in this paper is compared with the classical PID and backstepping control methods. Simulation results show that the ESO-Backstepping based control method can realize the stability control of DC bus voltage even when the parameters of the nonlinear system change. The method is simple and effective, and has good stability and strong robustness.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2016203006).

Key words: DC microgrid; DC bus voltage control; extended state observer; backstepping method; stability

0 引言

微电网是未来智能配用电系统的重要组成部分, 对推进节能减排和实现能源可持续发展具有重要意义^[1], 微电网作为一种新的供电模式在保证电网传输效率的同时可减少对环境的污染而被广泛关注。微电网主要有直流、交流和交直流混合 3 种运行方式。相比之下, 直流微电网减少了大量的电能变换环节, 将具有更高的系统转换效率; 同时, 不需要考虑配电线路的涡流损耗和线路吸收的无功能量, 线路损耗得到进一步降低。随着微电网中具有直流输出形式的直流型分布式电源(如太阳能电池、燃料电池等)和直流负荷的发展, 以及直流输

电对于商业、工业和居民直流负荷来说具有独特的优势, 而且直流配电系统无需考虑相位同步、谐波和无功功率损耗等方面的问题, 因此近年来直流微电网相关技术逐渐得到了产学研各界的广泛关注, 这为直流微电网的推广应用提供了良好的契机^[2]。直流微电网母线电压是否稳定是衡量直流微电网电能质量的主要指标。直流微电网中包含大量电力电子器件, 其运行的主要特点是恒功率负载运行^[3-5], 而微电网系统中的非线性、参数不确定等问题是影响母线电压稳定的关键因素。通过完善微电网的运行控制策略, 保证微电网稳定运行是“智能微电网”建设的核心与关键^[6-7]。

如何实现直流微电网母线电压的精确控制, 保证直流微电网的稳定运行, 是目前直流微电网技术研究的一项重点^[8-10]。近年来, 越来越多的非线性

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助 (F2016203006)

控制方法及多种控制方法的结合不断地应用到微电网中, 以解决直流微电网母线电压的稳定控制问题。文献[11]提出将直流微电网互联变换器作为潮流控制器, 并给出一种智能自适应下垂控制策略, 从而提高整个微电网系统的稳定性。文献[12]提出基于非线性干扰观测器的直流微电网母线电压控制方法, 有效抑制暂态直流母线电压的波动。文献[13]提出一种阻性虚拟阻抗加补偿虚拟阻抗的改进下垂控制策略, 阻性虚拟阻抗实现直流微电网稳态的功率分配, 补偿虚拟阻抗提升其动态性能; 通过对直流微电网进行小信号建模, 给出了补偿虚拟阻抗的参数设计过程。提升了母线电压的动态特性。文献[14]针对独立运行的直流微电网, 提出了一种适用于含光伏和储能的分层分布式协调控制策略。多个储能单元采用分层控制方法以维持直流母线电压的稳定。第一层控制采用适应性下垂控制方法, 下垂系数可根据储能电荷状态和额定功率进行自适应调整以平衡蓄电池的荷电状态。第二层控制采用基于离散一致性算法的二次电压恢复和电流均分控制, 仅通过与邻居节点间的通信实现母线电压调节和电流均分。文献[15]提出自适应全局滑模控制方法以确保微电网的稳定性和动态性能, 充分体现了滑模控制对参数不确定和外部扰动的鲁棒性。文献[16]提出一种基于动态反馈线性化的微电网直流母线电压控制策略, 采用分割系统的思路, 创建微电网简化模型, 达到更好调节直流电压的目的。文献[17]提出了一种基于自适应虚拟惯性的同步发电机控制策略, 该方法模拟同步发电机的行为, 构造频率变化律与虚拟惯性的关系, 自适应改变虚拟同步发电机控制的惯性, 从而提高微电网系统的抗干扰能力和动态稳定性。文献[18]提出基于滑模的直流微电网电压稳定控制方法, 选取指数趋近律计算控制律, 设计出的滑模控制器保证了系统的稳定性。

本文针对直流微电网系统中非线性及参数变化对母线电压稳定的影响, 首先根据微电网的拓扑结构推导出系统的非线性模型。基于扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)的思想, 将模型中的非线性部分视为扰动, 并对其进行观测, 采用 Backstepping 方法补偿此系统中的非线性部分, 进而克服非线性及参数变化对系统的不利影响, 并使系统镇定。ESO 和 Backstepping 相结合的控制方法, 可进一步提高直流微电网母线电压控制的稳定性和鲁棒性。

1 系统结构与模型转换

1.1 系统结构

直流微电网通常由分布式电源、电力电子装置、储能设备和负载单元等部分构成^[19], 图 1 给出了一个典型的直流微电网结构示意图, 有通过 DC-DC 变流器接入直流母线的负载(负载 1), 风电部分通过 AC-DC 整流装置接入直流母线, 电池板/光伏部分通过 DC-DC 变流器接入直流母线, 蓄电池通过 DC-DC 变流器接入直流母线, 还有直接接入直流母线的负荷电阻(负载 2)。双向 DC-AC 变流器为直流母线与大电网的转换接口, 可实现与直流母线的能量双向流动。整个系统是一个多源、多负荷的系统, 功率的稳定传输依赖于直流母线电压的稳定^[20-21]。

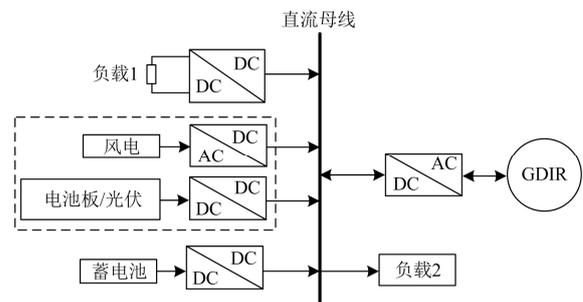


图 1 直流微电网结构图

Fig. 1 DC microgrid structure

为了便于研究和分析, 可将图 1 所示微电网简化为如图 2 所示的等效拓扑图形式。对图 1 的微电网系统, 以蓄电池作为系统输入, 其他看作等效负荷, 则蓄电池与直流母线间的 DC/DC 变换器应具有升压和降压的功能, 进而达到控制直流母线电压稳定的目的, 故按 buck-boost 变换器建立系统的等效拓扑结构。

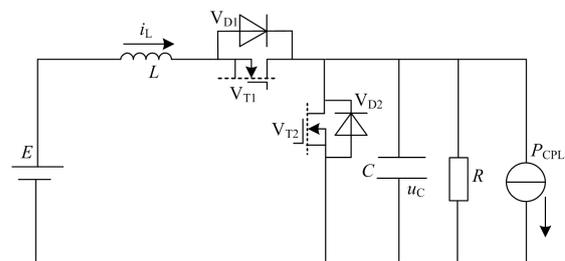


图 2 微电网等效拓扑图

Fig. 2 Microgrid equivalent topology

图中, C 为直流母线电容; L 为直流侧电感; P_{CPL} 为等效的恒功率负载, 为通过相应变流器接入直流母线的直流负荷、分布式电源输出(由风电和光伏系统组成, 如图 1 中的虚线框内所示)及双向

DC-AC 变流器输出功率之和; R 为直接接入直流母线的负载电阻; E 、 u_c 分别为蓄电池的端口电压和直流母线电压; i_L 为流经电感的电流; V_{D1} 、 V_{D2} 为系统的续流二极管; V_{T1} 、 V_{T2} 为开关。在运行状态中 V_{T1} 与 V_{T2} 互补导通。

对图 2 所示直流微电网等效拓扑图, 运用状态空间平均法列写电路方程可得

$$\begin{cases} C\dot{u}_c = di_L - \frac{u_c}{R} - \frac{P_{CPL}}{u_c} \\ L\dot{i}_L = E - du_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: d 为系统的控制量; 当 V_{T1} 导通时 $d=1$ 。当 V_{T2} 导通时 $d=0$ 。在式(1)中, 控制量 g 与状态变量 i_L 相乘, 状态变量 u_c 出现在分母的位置, 清晰地说明本文所研究的微电网为非线性系统。

在直流微电网系统运行过程中, 其系统参数 C 、 L 、 R 会发生变化, 影响母线电压的控制效果, 文献[22]采用自适应观测器的方法对参数变化进行观测, 采用滑模变结构控制方式消除参数不确定, 进而保证母线电压的输出稳定。

本文采用 ESO 结合 Backstepping 的控制方法。利用 ESO 观测微电网系统模型中的整体非线性部分, 参数变化也被同时观测出来。采用 Backstepping 方法对此非线性系统设计控制器, 控制器中的系统非线性部分用 ESO 观测值代替, 克服系统参数变化的影响。ESO-Backstepping 控制器可消除非线性及参数变化对系统的影响, 保证直流微电网母线电压的稳定性。

1.2 模型转换

将微电网系统的数学模型转换为标准非线性链式结构, 便于 Backstepping 控制器设计, 步骤如下。

第一步: 由式(1)可得

$$\begin{cases} \dot{u}_c = \frac{di_L}{C} - \frac{u_c}{CR} - \frac{P_{CPL}}{Cu_c} \\ \dot{i}_L = \frac{E}{L} - \frac{du_c}{L} \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)中的 u_c 求二次导数得

$$\ddot{u}_c = \frac{di_L}{C} - \frac{1}{CR} + \frac{P_{CPL}}{Cu_c^2} \quad (3)$$

整理得

$$\ddot{u}_c = \frac{dE}{CL} - \frac{d^2u_c}{CL} - \frac{1}{CR} + \frac{P_{CPL}}{Cu_c^2} \quad (4)$$

第二步: 取 $x_1 = u_c$, $x_2 = \dot{u}_c$, 则式(2)转化为如

式(5)非线性系统。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{d^2x_2}{CL} + \frac{P_{CPL}}{Cx_2^2} + \frac{dE}{CL} - \frac{1}{CR} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

取 $u = \frac{dE}{CL}$ 作为新的控制量, 式(5)中的非线性部分记作

$$f(x_1(t), x_2(t)) = -\frac{d^2x_2}{CL} + \frac{P_{CPL}}{Cx_2^2} - \frac{1}{CR} \quad (6)$$

可得标准非线性系统链式结构如式(7)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1(t), x_2(t)) + u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

2 扩张状态观测器设计

ESO 借用状态观测器的思想, 把能够影响被控输出的扰动作用扩张成新的状态变量, 用特殊的反馈机制建立能够观测被扩张的状态—扰动作用的扩张状态观测器 ESO^[23]。

由式(7)可看出, $f(x_1(t), x_2(t))$ 是非线性项, 且其参数在系统的运行过程中会发生变化, 以下将采用 ESO 对此非线性项 $f(x_1(t), x_2(t))$ 进行观测。

依据 ESO 原理, 将式(7)中的非线性部分 $f(x_1(t), x_2(t))$ 扩张成新的状态变量 x_3 , 记作

$$x_3 = f(x_1(t), x_2(t)) \quad (8)$$

令 $\dot{x}_3(t) = \omega(t)$, 将原系统式(7)扩张为新的等效模型, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + u \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

根据扩张状态观测器的设计思想^[24], 对式(9)所示的 3 阶等效模型可建立如下的 3 阶扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}|e_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_1) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}|e_1|^{\frac{1}{4}} \text{sign}(e_1) \end{cases} \quad (10)$$

选取合适的 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 的值, 系统就能很好地估计出状态变量 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 和被扩张的状态 $x_3 = f(x_1(t), x_2(t))$, 即

$$\begin{aligned} z_1(t) &\rightarrow x_1(t), z_2(t) \rightarrow x_2(t) \\ z_3(t) &\rightarrow x_3 = f(x_1(t), x_2(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

扩张状态观测器是一个动态过程, 它只涉及了输入输出的相关信息, 没有非线性函数 $f(x_1(t), x_2(t))$ 的相关信息, 故其设计过程不依赖于系统的数学模型^[25], 对应的结构图如图 3 所示。

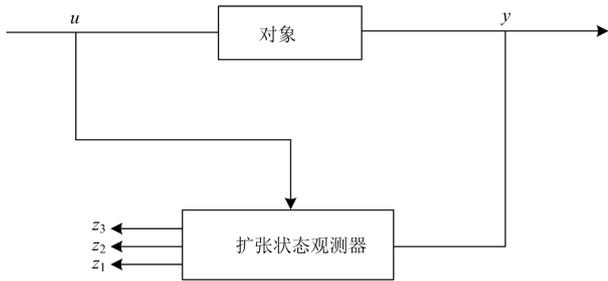


图 3 扩张状态观测器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of extended state observer

这里无论函数 x_3 即 $f(x_1(t), x_2(t))$ 是连续的还是非连续的, 是已知的还是未知的, 只要它在系统进程中的实时作用量 $x_3 = f(x_1(t), x_2(t))$ 是有界的, 就可以选择合适的参数 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 使得扩张状态观测器式(10)能实时估计出被扩张的状态 $x_3(t)$ 即式(7)中的非线性部分 $f(x_1(t), x_2(t))$, 达到本文的设计目标。

3 Backstepping 控制器设计

Backstepping 设计的主要思想是递推法, 它将一个高阶系统设计问题分为一系列低阶系统设计, 逐步引入虚拟控制的概念, 一步一步设计满足要求的虚拟控制, 利用 Lyapunov 函数得到整个系统渐近稳定的解耦控制律^[26]。目前, Backstepping 设计已经应用到各领域, 其稳定性及误差收敛性已经得到广泛证明^[27-28]。

上一节设计出 ESO 观测器, 完成了对式(7)所示系统非线性部分 $f(x_1(t), x_2(t))$ 的观测, 本节将对式(7)所示的非线性系统设计 Backstepping 控制器。控制器中对应式(7)中的非线性部分 $f(x_1(t), x_2(t))$, 用 ESO 观测器的观测值替代, 实现了对系统非线性部分及参数变化的实时观测, 进而可对系统参数变化进行补偿, 保证微电网控制系

统直流母线电压的稳定输出。非线性控制律设计主要分为三个步骤。

(1) 研究 x_1 子系统, 选取正定 Lyapunov 函数

$$V_1(x_1) = \frac{1}{2}x_1^2 \quad (12)$$

将 x_2 看成 x_1 子系统的虚拟控制。

$$x_2 = h_2 + \alpha_1(x_1) \quad (13)$$

式中: h_2 为引入的虚拟控制; $\alpha_1(x_1)$ 满足 $\alpha_1(0) = 0$, 并选取 $\alpha_1(x_1) = -k_1x_1$, 其中 $k_1 > 0$, 且为可调整的参数。则由式(13)得

$$h_2 = x_2 + k_1x_1 \quad (14)$$

这时沿着系统轨迹 $V_1(x_1)$ 的时间导数为

$$\dot{V}_1(x_1) = x_1\dot{x}_1 = x_1x_2 \quad (15)$$

将式(14)代入式(15)得

$$\dot{V}_1(x_1) = x_1(h_2 - k_1x_1) = -k_1x_1^2 + x_1h_2 \quad (16)$$

(2) 考虑 (x_1, x_2) 子系统, 构造 Lyapunov 函数为

$$V_2(x_1, x_2) = V_1(x_1) + \frac{1}{2}h_2^2 \quad (17)$$

$V_2(x_1, x_2)$ 的时间导数为

$$\dot{V}_2(x_1, x_2) = \dot{V}_1(x_1) + h_2\dot{h}_2 \quad (18)$$

结合式(7)与式(13)得

$$\dot{h}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1(x_1) = f(x_1, x_2) + u + k_1\dot{x}_1 \quad (19)$$

将式(16)、式(19)代入式(18), 最终得式(20)的表达式为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(x_1, x_2) &= \dot{V}_1(x_1) + h_2\dot{h}_2 = \\ &= -k_1x_1^2 + x_1h_2 + h_2[f(x_1, x_2) + u + k_1x_2] \end{aligned} \quad (20)$$

(3) 若使得系统稳定, 需取解耦控制律为

$$u = -f(x_1, x_2) - k_1x_2 - x_1 - k_2h_2 \quad (21)$$

式中, $k_2 > 0$, 且为可调整的参数。

将式(14)代入式(21)最终得解耦控制律表达式为

$$u = -f(x_1, x_2) - k_1x_2 - x_1 - k_2(x_2 + k_1x_1) \quad (22)$$

得到 $V_2(x)$ 的时间导数满足

$$\dot{V}_2(x) = -k_1h_1^2 - k_2h_2^2 \quad (23)$$

保证了系统的全局稳定。由式(11)和式(22)可得基于 ESO 的控制律为

$$u = -z_3 - k_1x_2 - x_1 - k_2(x_2 + k_1x_1) \quad (24)$$

式中, $z_3 = \hat{f}(x_1(t), x_2(t))$ 为采用 ESO 对 $f(x_1(t), x_2(t))$ 的估计。

基于 ESO-Backstepping 的直流微电网控制框图如图 4 所示。

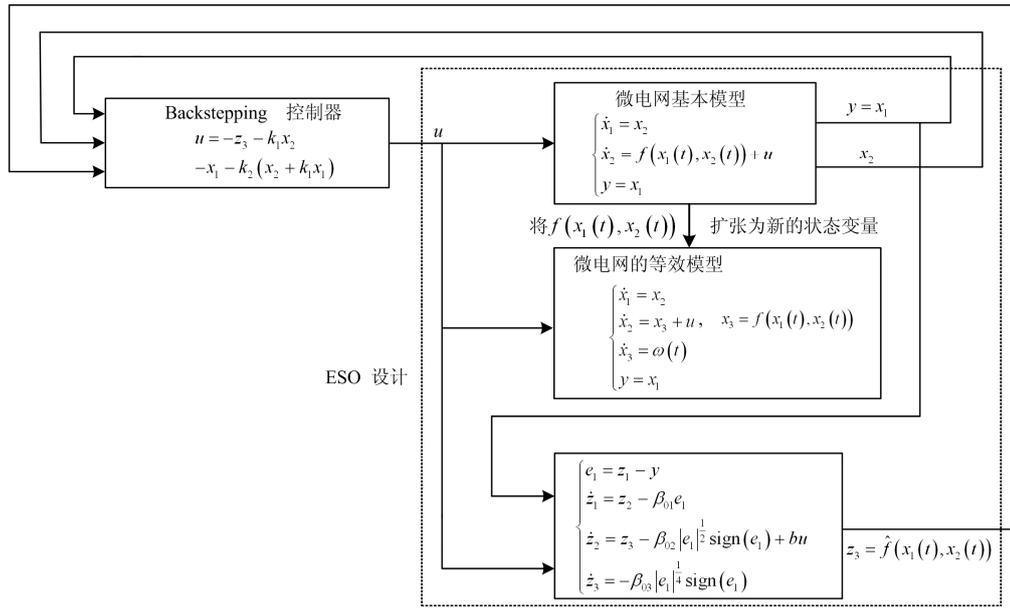


图 4 ESO-Backstepping 控制原理框图

Fig. 4 Control principle block diagram of ESO-Backstepping

实际应用时，以蓄电池作为系统输入，其他看作等效负荷，由于存在风电及光伏发电等微电源，则等效负荷存在较大的波动，采用本文提出的控制方法，通过控制蓄电池与直流母线间的 DC/DC (buck-boost)变换器达到控制直流母线电压稳定的目的。

4 仿真分析

为了验证提出方法的有效性，进行仿真研究微电网系统的参数设置如下： $E=180\text{ V}$ ， $L=8\text{ mH}$ ， $C=0.5\text{ mF}$ ， $R=40\ \Omega$ ，通过相应变流器接入直流母线的直流负荷功率 $P_1=2\ 000\text{ W}$ 、分布式电源输出 $P_2=500\text{ W}$ 、双向 DC-AC 变流器向电网输出功率 $P_3=500\text{ W}$ ，则得 $P_{\text{CPL}}=2\ 200\text{ W}$ 。仿真结果如图 5 所示。图 5 中给出了采用 ESO-Backstepping 控制的仿真结果，也给出了只采用 Backstepping 控制的仿真结果以及采用 PID 控制的仿真结果，以便比较。经过反复试验，最终设定的 ESO 参数为： $\beta_{01}=100$ ， $\beta_{02}=1000$ ， $\beta_{03}=-10$ ；Backstepping 控制器的参数为： $k_1=1000$ ， $k_2=30$ ；PID 调节器参数设定为： $k_p=300$ ， $k_i=50$ ， $k_d=8$ 。

由图 5 可知，采用 Backstepping 控制，直流母线电压能在 $t \approx 0.18\text{ s}$ 时趋于稳定，过渡过程无超调，控制效果最优。ESO-Backstepping 和 Backstepping 的控制效果几乎相同，ESO-Backstepping 略次之，主要原因是在微电网参数确定的情况下，直接采用

Backstepping 控制时，控制器中的非线性部分就是系统的非线性部分，因而控制效果最好。而采用 ESO-Backstepping 控制方案时，控制器中的非线性部分是采用 ESO 对系统非线性部分进行观测，控制效果取决于观测效果。可看出由于观测精度较高，ESO-Backstepping 和 Backstepping 的控制效果几乎相同。而采用经典 PID 控制方法超调量大： $\sigma \approx 7.38\%$ ，且达到电压稳定时间长： $t \approx 0.63\text{ s}$ ，控制效果不理想。

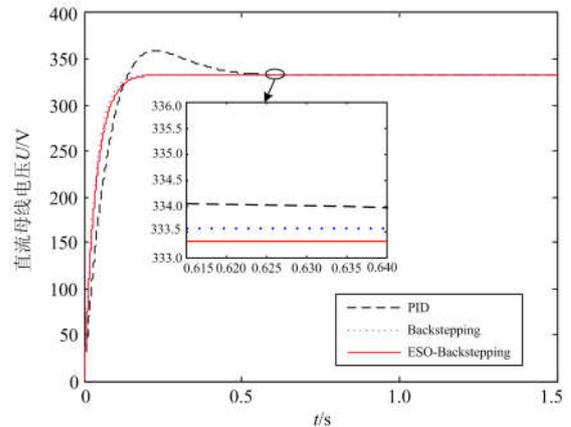


图 5 直流微电网的母线电压曲线

Fig. 5 Bus voltage curve of DC microgrid

为了验证系统参数变化时的控制效果，下面分三组情况讨论。情况 1：只系统参数发生变化。直接接入直流母线的负荷电阻变化为： $R=30\ \Omega$ ，直流母线电容变为： $C=0.6\text{ mF}$ ，仿真结果如图 6 所示。

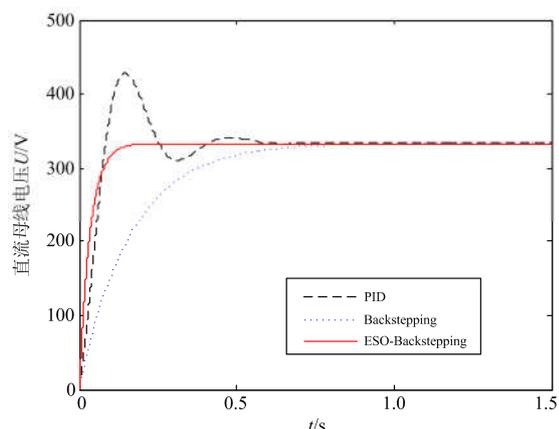


图 6 R 、 C 发生变化时直流微电网的母线电压曲线
Fig. 6 Bus voltage curve of DC microgrid when system parameters R and C change

由图 6 可知, 当系统参数发生变化后, 与系统参数未变化时相比, 采用经典 PID 控制得到的母线电压出现更大幅度振荡, 超调量为: $\sigma \approx 21.49\%$, 达到电压稳定的时间更长: $t \approx 0.75$ s, 控制效果更不理想。只采用 Backstepping 控制, 仍然无超调, 但是输出电压达到电压稳定的时间变长: $t \approx 0.85$ s, 与参数变化前相比, 控制效果变化大, 比 PID 的调节时间还长, 说明控制器对参数变化的鲁棒性差。而采用 ESO-Backstepping 控制, 母线电压值仍不存在超调, 达到电压稳定所需时间也未变, 说明采用 ESO-Backstepping 控制方案, 对系统的参数变化起到了很好的观测和补偿作用, 控制性能与参数变化前的相同, 说明控制器对参数变化的鲁棒性强, 控制效果最好。

情况 2: 只有等效的恒功率负载发生变化。设等效的恒功率负载变为: $P_{\text{CPL}} = 2200$ W。仿真结果如图 7 所示。

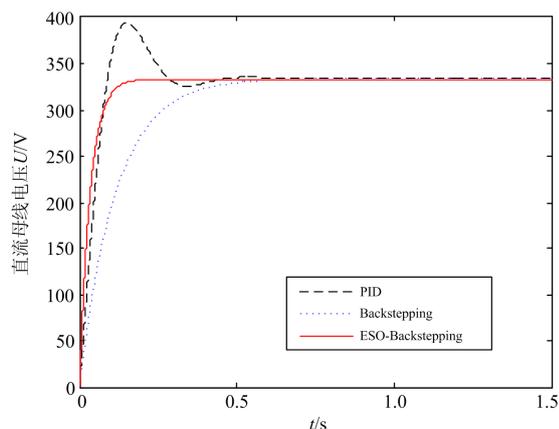


图 7 P_{CPL} 发生变化时直流微电网的母线电压曲线
Fig. 7 Bus voltage curve of DC microgrid when P_{CPL} change

由图 7 可知, 当 P_{CPL} 发生变化后, 与 P_{CPL} 未变时相比, 采用经典 PID 控制得到的母线电压仍出现较大幅度振荡, 超调量为: $\sigma \approx 15.84\%$, 达到电压稳定的时间变长: $t \approx 0.56$ s, 控制效果不理想。只采用 Backstepping 控制, 仍然无超调, 但是输出电压达到电压稳定的时间变长: $t \approx 0.61$ s, 与 P_{CPL} 变化前相比, 控制效果变化大, 比 PID 的调节时间还长, 说明控制器的鲁棒性差。而采用 ESO-Backstepping 控制, 母线电压值仍不存在超调, 达到电压稳定所需时间也未变, 说明采用 ESO-Backstepping 控制方案, 对 P_{CPL} 的变化起到了很好的观测和补偿的作用, 控制性能与参数变化前的相同, 说明控制器对 P_{CPL} 变化的鲁棒性强, 控制效果最好。

情况 3: 系统参数和 P_{CPL} 同时改变。直接接入直流母线的负荷电阻变为: $R = 30 \Omega$, 直流母线电容变为: $C = 0.6$ mF, 等效的恒功率负载变为 $P_{\text{CPL}} = 2200$ W, 仿真结果如图 8 所示。

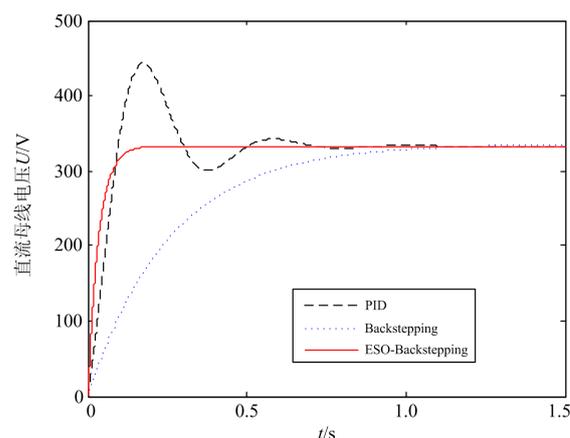


图 8 R 、 C 和 P_{CPL} 均发生变化时直流微电网的母线电压曲线
Fig. 8 Bus voltage curve of DC microgrid when R 、 C and P_{CPL} change

由图 8 可知, 当 R 、 C 和 P_{CPL} 均发生变化, 采用经典 PID 控制得到的母线电压出现更大幅度的振荡, 超调量为: $\sigma \approx 26.45\%$, 达到电压稳定的时间更长: $t \approx 1.08$ s, 控制效果非常不理想。只采用 Backstepping 控制, 虽然无超调, 但是输出电压达到稳定的时间更长: $t \approx 1.08$ s, 与 PID 控制的调整时间相同, 与变化前相比, 控制效果变化大, 说明控制器对 R 、 C 和 P_{CPL} 均发生变化的鲁棒性更差。而采用 ESO-Backstepping 控制, 母线电压值仍不存在超调, 达到电压稳定所需时间也未变, 说明采用 ESO-Backstepping 控制方案, 对系统参数和 P_{CPL} 变化起到了很好的观测和补偿的作用, 控制性能与系

统参数和 P_{CPL} 变化前的相同, 说明控制器对系统参数和 P_{CPL} 变化的鲁棒性强, 控制效果最好。

由以上仿真实验可知, 在参数不变的情况下, ESO-Backstepping 控制和 Backstepping 控制均能很好地维持系统直流母线电压稳定, 控制效果均优于经典的 PID 控制。而当系统参数发生变化时, 采用 ESO-Backstepping 控制器, 可通过 ESO 观测系统的非线性部分及参数变化, 进而可通过 Backstepping 控制器予以补偿, 因而仍具有很好的控制效果。而仅采用 Backstepping 的控制器因无法观测系统参数变化引起的不确定, 进而无法进行有效的补偿, 系统出现调整时间变长的情况。经典的 PID 控制器虽然对系统参数变化具有一定的鲁棒性, 但是其通过误差来调节误差的机理, 使其不可避免地存在超调量大, 过渡过程时间长的缺点。由此可见, 基于 ESO-Backstepping 控制的微电网系统能很好地维持直流母线电压的稳定运行, 且对系统参数变化具有很强的鲁棒性。

5 结论

针对直流微电网中存在的非线性和参数变化等问题, 提出一种 ESO-Backstepping 控制方法, 首先用 ESO 观测出微电网系统等效模型中的非线性部分, 然后在设计 Backstepping 控制器时, 用 ESO 观测器的观测值替代, 实现了对系统非线性部分及参数变化的实时观测, 进而可对系统参数变化进行补偿, 解决了直流微电网参数变化影响控制效果的问题, 保证了直流微电网母线电压的稳定。仿真结果验证了控制方法的可行性, 与经典 PID 控制方案及只采用 Backstepping 控制方案相比, ESO-Backstepping 控制方案无超调、且快速稳定, 具有更高的暂态性能和鲁棒性。

参考文献

- [1] 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): 2-16.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A review of the key technologies of DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-16.
- [2] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 96-110.
WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. Summary of classification and suppression methods of bus voltage fluctuation in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 96-110.
- [3] DU W, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Stability criterion for cascaded system with constant power load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1843-1851.
- [4] ANAND S, FERNANDES B G. Reduced-order model and stability analysis of low-voltage DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(11): 5040-5049.
- [5] 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, 2017, 6(6): 2770-2783.
- [6] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. Summary of research on microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [7] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态-基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16.
LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. The main shape of the future distribution network-low-voltage DC microgrid based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.
- [8] SHUAI Z, FANG J, NING F, et al. Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid[J]. IEEE Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82(3): 3670-3682.
- [9] GU Y, XIANG X, LI W, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [10] CHEN D, XU L, YAO L. DC voltage variation based autonomous control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 637-648.
- [11] 邓诗蕾, 王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 40-46.
DENG Shilei, WANG Mingyu. DC microgrid power flow controller and distributed energy storage cooperative control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 40-46.
- [12] 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): 350-359.
LI Xialin, GUO Li, FENG Yibin, et al. A nonlinear disturbance observer based DC bus voltage control for a DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 350-359.

- [13] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [14] 朱承治, 俞红生, 周开河, 等. 基于一致性算法的独立直流微电网分层协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(11): 144-150.
ZHU Chengzhi, YU Hongsheng, ZHOU Kaihe, et al. Hierarchical coordinated control strategy of independent DC microgrid based on consistency algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(11): 144-150.
- [15] 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.
- [16] PEREZ F, IOVINE A, DAMM G, et al. DC microgrid voltage stability by dynamic feedback linearization[C] // 2018 IEEE International Conference Industrial Technology, February 20-22, 2018, Lyon, France: 28-31.
- [17] 刘尧, 陈建福, 侯小超, 等. 基于自适应虚拟惯性的微电网动态频率稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 75-82.
LIU Yao, CHEN Jianfu, HOU Xiaochao, et al. Dynamic frequency stability control strategy of microgrid based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 75-82.
- [18] 朱龙, 唐梦雪, 魏久林, 等. 基于滑模的直流微电网电压稳定方法[J]. 电工技术, 2018(11): 9-11.
ZHU Long, TANG Mengxue, WEI Jiulin, et al. Voltage stabilizer for DC microgrid based on sliding mode method[J]. Electrical Technology, 2018(11): 9-11.
- [19] ALI A, REZA N, KAZEM M. Simultaneous control and protection schemes for DC multi microgrids systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 104(2): 230-245.
- [20] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2008, 38(1): 72-84.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Review of droop control technology for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 38(1): 72-84.
- [21] CAVALCANTI M C, BRADASCHI F, MELONETO M T, et al. Dynamic modeling and control system design of the buck-boost-based three-state three-phase Z-source inverter[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104(1): 654-663.
- [22] 张丹, 王杰, 弥潇. 直流微电网自适应滑模控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 138-143.
ZHANG Dan, WANG Jie, MI Xiao. Adaptive sliding mode control strategy for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 138-143.
- [23] CASTANEDA L A, LUVIANO-JUAREZ A, OCHOA-ORTEGA G, et al. Tracking control of uncertain time delay systems: an ADRC approach[J]. Control Engineering Practice, 2018, 78: 97-104.
- [24] 韩京清, 张荣. 二阶扩张状态观测器的误差分析[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(4): 465-471.
HAN Jingqing, ZHANG Rong. Error analysis of second order extended state observer[J]. Systems Science and Mathematics, 1999, 19(4): 465-471.
- [25] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [26] 焦晓红, 关新平. 非线性系统分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [27] WEN G, GE S S, TU F. Optimized backstepping for tracking control of strict-feedback systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems, 2018, 29(8): 1-13.
- [28] ROY T K, MAHMUD M A. Dynamic stability analysis of hybrid islanded DC microgrids using a nonlinear backstepping approach[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3120-3130.

收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-08-21

作者简介:

吴忠强(1966—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为可再生能源发电及控制; E-mail: mewzq@163.com

王云青(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网母线电压稳定控制; E-mail: 1027036101@qq.com

赵德隆(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电及控制。E-mail: 502884586@qq.com

(编辑 周金梅)